

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Jhonatan Acacio Silva

**ANÁLISE DO PROCESSO DE FURAÇÃO EM COMPÓSITO
COM MATRIZ DE POLIESTER REFORÇADO COM FIBRAS
DE VIDRO**

Florianópolis

2015

Jhonatan Acacio Silva

**ANÁLISE DO PROCESSO DE FURAÇÃO EM
COMPÓSITO COM MATRIZ DE POLIESTER
REFORÇADO COM FIBRAS DE VIDRO**

Dissertação de Mestrado submetido ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Santa Catarina para a
obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Lourival Boehs

Coorientador: Prof. Dr. Guilherme
Mariz de Oliveira Barra

Florianópolis

2015

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.**

Silva, Jhonatan Acacio

ANÁLISE DO PROCESSO DE FURAÇÃO EM COMPÓSITO COM MATRIZ DE POLIESTER REFORÇADO COM FIBRAS DE VIDRO / Jhonatan Acacio Silva ; orientador, Lourival Boehs ; coorientador, Guilherme Mariz de Oliveira Barra. - Florianópolis, SC, 2015.

117 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Furação. 3. Delaminação. 4. Materiais Compósitos. I. Boehs, Lourival. II. Barra, Guilherme Mariz de Oliveira. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Jhonatan Acacio Silva

**ANÁLISE DO PROCESSO DE FURAÇÃO EM COMPÓSITO
COM MATRIZ DE POLIESTER REFORÇADO COM FIBRAS
DE VIDRO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de
“Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 29 de Maio de 2015.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Prof. Lourival Boehs, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Guilherme Mariz de Oliveira Barra, Dr.
Coorientador

Banca Examinadora:

Prof. Lourival Boehs, Dr. Eng. - Presidente
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Antonio Pedro Novaes de Oliveira, Dr. Ing.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTO

Agradecer especialmente ao meu orientador, Professor Lourival Boehs pela sua orientação, conhecimento e dedicação durante todas as etapas desta dissertação.

Ao coorientador Professor Guilherme Barra que me ajudou com os ensaios mecânicos, fornecimento dos materiais compósitos além da sua dedicação e seu conhecimento repassado.

Aos técnicos do Laboratório USICON – UFSC, pelos seus esforços e dedicação, pelo espaço físico e apoio técnico para a realização dos ensaios de furação.

À Universidade do Vale do Itajaí, especialmente aos amigos e professores Roberto Barddal e Marcelo Cadori e também aos técnicos dos laboratórios, que concederam espaço físico e apoio técnico para a fabricação dos corpos de prova.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica (POSMEC) da Universidade Federal de Santa Catarina, pelo fornecimento dos recursos para aquisição das ferramentas.

Gostaria de agradecer aos meus Pais, minha namorada e aos familiares pela compreensão em entender minha ausência durante a dissertação e durante todas as etapas dessa pesquisa. Também aos meus amigos Maykon Adriano, Guilherme Koerich, Laércio Evaristo e Gabriel Balparda que sempre me apoiaram e dividiram seus conhecimentos e experiências que foram úteis nos momentos mais difíceis desta fase juntamente com a Graça de Deus.

RESUMO

Materiais compósitos reforçados com fibras têm sido amplamente utilizados na substituição de materiais metálicos devido às propriedades vantajosas, tais como: alta relação entre resistência mecânica/peso, alta resistência à fratura e estabilidade química. Dentre esses materiais compósitos encontra-se o PRFV (polímero reforçado com fibra de vidro) que está sendo utilizado em larga escala na fabricação de embarcações de pequeno, médio e grande porte, além de algumas aplicações estruturais na indústria automotiva e aeroespacial. A furação é o processo de usinagem mais empregado para este tipo de materiais. No entanto, a furação desses materiais acarreta diversos danos como delaminação (separação entre as camadas do material), falta de circularidade e formação de rebarba na entrada e saída dos furos. Este estudo busca analisar a influência de diferentes parâmetros de corte e características das brocas na qualidade da superfície dos furos obtidos no processo de furação. Para os testes práticos foi utilizado centro de usinagem vertical. Os corpos de prova são constituídos de um material compósitos com matriz poliéster e reforçados com fibra de vidro. As brocas helicoidais com ângulo de ponta de 118°, 130°, 135° e 140° apresentaram seus piores resultados de Fda(entrada), nos experimentos realizados com avanço de 0,30mm e velocidade de corte de 57 m/mim. As brocas com ângulo de ponta de 118°, 130° e E-90° geraram estatisticamente os melhores resultados desta pesquisa para os valores de Fda(entrada) e Fda(saída) com o avanço de 0,08mm e velocidade de corte de 10m/mim, que foram. As informações obtidas nesse estudo visam ampliar informações e conhecimento sobre este assunto.

Palavras chave: Furação, delaminação, materiais compósitos.

ABSTRACT

Fiber-reinforced composite materials have been widely used to replace metallic materials due to their high properties, i.e.: high relation of strength/weight, high fracture resistance, and chemical stability. Among these composite materials, the FRP has been used in large-scale in the shipbuilding industry to manufacture of small, medium and large ships, and some structural applications in the automotive and aerospace industries. The drilling is the process of machining more used to this kind of material. However, the drilling of these materials causes much damage as delamination, low roundness and burr formation in entrance and exit of the holes. This research seeks to analyze the influence of different cutting parameters and characteristics of the drill bits in the quality of the surface of the holes obtained drilling process. To carry out the practical testing will be used machining centers. The samples are made of a composite material with polyester matrix and reinforced with glass fiber. The twist drills with point angle of 118° , 130° , 135° and 140° presented its worst results $F_{da}(\text{input})$, in experiments with feed rate of 0,30mm and cutting speed of 57m/m. The drills bit with point angle of 118° , 130° and E-90 statistically showed the same results for $F_{da}(\text{entrance})$ and $F_{da}(\text{exit})$ with the feed rate of 0,08mm and cutting speed of 10m/m. The information obtained in this research intends to expand information and knowledge on this subject.

Keywords: *Drilling, delamination, composites materials.*

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1: Representação simples dos materiais compósitos.....	27
Figura 2: Esquema dos compósitos reforçados por fibras.....	27
Figura 3: Representação das orientações das fibras.	29
Figura 4: Estrutura química resina ortoftálica.....	31
Figura 5: Representação da laminação manual.	32
Figura 6: Partes básicas e detalhes da ponta de uma broca helicoidal... 34	
Figura 7: Diferentes tipos de broca.	35
Figura 8: Brocas especiais para furação de materiais compósitos.....	35
Figura 9: Delaminação na entrada e na saída do furo.	36
Figura 10: Detalhamento das fibras de vidro.	47
Figura 11: Representação dos furos e chapa de fixação.....	49
Figura 12: Representação da extração dos corpos de prova da chapa laminada.	50
Figura 13: Processo de laminação.	51
Figura 14: Suporte de fixação.	53
Figura 15: Ensaio de furação.....	56
Figura 16: (A) Imagem do furo. (B) Imagem do furo após filtro binário.	58
Figura 17: Representação dos dados para cálculo do Fda.	59
Figura 18: Rebarbas por falta de rompimento da fibra.....	59
Figura 19: Comportamento da força em relação ao tempo nos corpos de prova.....	63
Figura 20: Corpos de prova rompidos pelo ensaio de tração	64
Figura 21: Corpos de prova rompidos pelo ensaio de impacto.	66
Figura 22: Imagens dos danos na entrada do furo.....	68
Figura 23: Imagem dos danos na saída do furo.....	68
Figura 24: Resultados médios para Fda(entrada) – $[0^{\circ}/90^{\circ}]$ e $[-45^{\circ}/45^{\circ}]$	71
Figura 25: Efeitos principais para Fda(entrada).	74
Figura 26: Resultados médios para Fda(saída) – $[0^{\circ}/90^{\circ}]$ e $[-45^{\circ}/45^{\circ}]$. .	77
Figura 27: Efeitos principais para Fda(saída).....	78
Figura 28: Melhores resultados Fda(entrada) e Fda(saída).	81
Figura 29: Análise comparativa e qualitativa entre furos e materiais. ..	82
Figura 30: Imagens de furos com mesmo Fda(saída).....	83
Figura 31: Comparativo Fda(entrada) entre $[0^{\circ}/90^{\circ}]$ e $[-45^{\circ}/45^{\circ}]$	84
Figura 32: Comparativo Fda(saída) entre $[0^{\circ}/90^{\circ}]$ e $[-45^{\circ}/45^{\circ}]$	85
Figura 33: Comparativo entre materiais - Fda(saída) e $f=0,30\text{mm}$	85
Figura 34: Diferentes espessuras de rebarba nos materiais.	86

Figura 35: Comparativo entre brocas - $v_c=10\text{m/mim}$	87
Figura 36: Comparativo entre brocas - $v_c= 28 \text{ m/mim}$	88
Figura 37: Comparativo entre brocas - $v_c=57\text{m/mim}$	90
Figura 38: Estado das brocas 118° , 130° e $E-90^\circ$	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Composições químicas das fibras de vidro.	29
Quadro 2: Comparação da resistência mecânica entre vidro E e S.	29
Quadro 3: Comparativo entre métodos para quantificar a delaminação.	39
Quadro 4: Comparativo entre trabalhos anteriores.	41
Quadro 5: Planos de laminação dos corpos de prova.	48
Quadro 6: Características do Centro de usinagem.	53
Quadro 7: Informações sobre as brocas deste experimento.	54
Quadro 8: Variáveis do experimento.	55
Quadro 9: Condições da broca conforme número de furos.	55
Quadro 10: Resultados do cálculo de fração volumétrica de fibra.	62
Quadro 11: Resultados dos ensaios de resistência à tração.	63
Quadro 12: Resultados dos ensaios de resistência ao impacto.	65
Quadro 13: Comparativo entre fatores de delaminação $[0^\circ/90^\circ]$ para broca E-90°, com $v_c=28\text{m/mim}$ e $f=0,15\text{mm}$	69
Quadro 14: Comparativo entre fatores de delaminação $[-45^\circ/45^\circ]$ para broca 135°, com $v_c=10\text{m/mim}$ e $f=0,30\text{mm}$	70
Quadro 15: Resultados médios para Fda(entrada) – $[0^\circ/90^\circ]$ e $[-45^\circ/45^\circ]$	72
Quadro 16: Análise de Variância Fda(entrada) para ambos os materiais.	73
Quadro 17: Resultados médios para Fda(saída) – $[0^\circ/90^\circ]$ e $[-45^\circ/45^\circ]$	76
Quadro 18: Análise de Variância Fda(saída) para ambos os materiais.	77
Quadro 19: Melhores resultados para Fda(entrada) e Fda(saída).	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACOBAR		Associação de Brasileira de Construtores de Barcos
ANOVA		Análise de variância
ASTM		<i>American Society for Testing and Materials</i>
BC		Broca chata
BH		Broca helicoidal
CFRP		Polímero reforçado com fibra de carbono
CP		Corpo de prova
DP		Desvio Padrão
FE	[N]	Força de empuxo
FEM		<i>Finite element method</i>
FT	[N]	Força de torque
Fv	[%]	Fração volumétrica
GF		Geometria da ferramenta
GFRP		Polímero reforçado com fibra de vidro
GL		Graus de liberdade
HENM		<i>Hybrid experimental numerical methodology</i>
MD		Metal Duro
ME	[Gpa]	Módulo de Elasticidade
MECK		Peróxido de Metil-Etil-Cetona
MF		Múltiplas Faces
MQ		Média dos quadrados
PC		Parâmetros de corte
PM		Propriedades mecânicas
PRFV		Plástico Reforçado com Fibra de Vidro
SQ		Soma dos quadrados

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto Latino

A0	[mm ²]	Área do círculo em relação ao diâmetro da broca
Acp	[mm ²]	Área do corpos de prova
Ad	[mm ²]	Área delaminada
Amáx	[mm ²]	Área círculo em relação ao diâmetro máximo delaminado
D0	[mm]	Diâmetro da broca
Deq	[mm]	Diâmetro equivalente
Dmáx	[mm ²]	Diâmetro máximo delaminado
Dpmáxi	[mm]	Diâmetro do pico
Dpmini	[mm]	Diâmetro do vale
E-90°		Broca especial para materiais compósitos com ângulo de ponta de 90°
Es	[J]	Valor da energia após impacto
Fd		Fator de delaminação convencional
Fda		Fator de delaminação ajustado
Fda(entrada)		Fator de delaminação ajustado na entrada dos furos
Fda(saída)		Fator de delaminação ajustado na saída dos furos
Fdp		Fator de delaminação proposto
Gcp	[g/m ²]	Gramatura total plano de laminação
HSS		Aço Rápido
HSSE		Aço Rápido com alto teor de Vanádio
Is	[J/m]	Resistência ao impacto
Pbal	[g]	Peso total do corpos de prova
R	[mm]	Raio da Ferramenta
R _{máx}	[mm]	Raio máximo delaminado
t	[mm]	Espessura do corpo de prova
TiN		Nitreto de Titânio
UD		Unidirecional
v _c	[mm/mim]	Velocidade de corte

Alfabeto Grego

α	[°]	Ângulo da região danificada
β	[°]	Ângulo atingido pelo pêndulo
δ	[°]	Ângulo de hélice
σ	[°]	Ângulo de Ponta
ψ	[°]	Ângulo do gume transversal
f	[mm]	Avanço
\varnothing	[mm]	Diâmetro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 OBJETIVO GERAL	24
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
1.3 CONTRIBUIÇÕES	24
2 REFERENCIAL DE PESQUISA	25
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS	25
2.1.1 Classificação dos materiais compósitos	26
2.1.2 Compósitos poliméricos reforçados por fibras	27
2.1.3 Fibra de vidro	28
2.1.4 Matriz Polimérica	30
2.1.5 Resinas Poliéster	30
2.1.6 Processo de Fabricação	32
2.2 PROCESSO DE FURAÇÃO	32
2.2.1 Geometria e nomenclaturas das brocas	33
2.2.2 Tipos de brocas	34
2.3 FURAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS	35
2.3.1 Delaminação	36
2.3.2 Métodos para quantificar a delaminação	37
2.4 PESQUISA E RESULTADOS ANTERIORES	38
3 MATERIAIS, MÉTODOS E EQUIPAMENTOS	46
3.1 CORPOS DE PROVA	46
3.1.1 Materiais dos corpos de prova	46
3.1.2 Dimensões dos corpos de prova	49
3.1.3 Fabricação dos corpos de prova	50
3.2 PROCESSO DE FURAÇÃO, MÁQUINA E FERRAMENTAS	52
3.2.1 Máquina-ferramenta	52
Fonte: Autor.	53
3.2.2 Brocas utilizadas	54
3.2.4 Metodologia de furação	55
3.3 MEIOS DE MEDIÇÃO	56
3.3.1 Fração volumétrica de fibra	57
3.3.2 Propriedades mecânicas	57
3.3.3 Aquisição das imagens e análises dos furos	58
3.3.4 Fator de Delaminação	58
3.3.4 Análise estatística	60

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	61
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	61
4.1.1 Fração volumétrica de fibra de vidro dos corpos de prova	61
4.1.2 Resistência à tração	62
4.1.3 Resistência ao impacto	65
4.2 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS FUROS	67
4.2.1 Resultados dos métodos para quantificar a delaminação	68
4.2.2 Danos na entrada dos furos	70
4.2.3 Danos na saída dos furos	75
4.2.4 Correlação entre resultados Fda(entrada) e Fda(saída)	79
4.2.5 Comparativo entre os corpos de prova	83
4.2.6 Comparativo entre as brocas	86
5 CONCLUSÃO	94
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	96
REFERÊNCIAS	97
Apêndice A – Organização dos parâmetros e sequência dos ensaios.	103
Apêndice B – Resultados teste Tukey para Fda(entrada) em ambos os materiais.	105
Apêndice C – Imagens da entrada dos furos [0°/90°].	107
Apêndice D – Imagens da entrada dos furos [-45°/45°].	109
Apêndice E – Resultados teste Tukey para Fda(saída) em ambos os materiais.	111
Apêndice F – Imagens da saída dos furos [0°/90°].	113
Apêndice G – Imagens da saída dos furos [-45°/45°].	115
Anexo A – Processo de montagem de uma embarcação.	117

1 INTRODUÇÃO

A indústria náutica tem mantido ritmo forte de crescimento a taxas de 15% ao ano, mesmo no período pós-crise global, capaz de gerar cerca de 30 mil empregos no Brasil no ano de 2012. No mercado de embarcações de luxo e grande porte, topo dessa pirâmide de consumo, em que os prazos e o custo de capital para se adaptar ao crescimento da demanda são muito maiores, abriu-se as portas para um grande número de marcas internacionais, que passaram a perceber o Brasil como um mercado de alto potencial, principalmente diante da crise econômica que afeta os países centrais, com destaque para a comunidade do Euro (ACOBAR, 2012).

O uso de materiais compósitos em peças estruturais ao invés de ligas metálicas tem crescido rapidamente em diversos setores, devido às suas boas propriedades, como por exemplo, relação resistência-peso, alta resistência à fratura e resistência à corrosão (TSAO *et al.*, 2012). Na fabricação de materiais compósitos após a peça ser retirada do molde, normalmente esta peça já adquire a forma e acabamento final desejado, assim sendo necessário um processo de usinagem para ajuste e/ou montagem. A furação é o processo mais utilizado em materiais compósitos (WERTHEIM *et al.*, 2012). No entanto, o processo de furação em materiais compósitos acarreta inúmeros defeitos, como delaminação, falta de circularidade, rebarba na entrada e saída dos furos. É necessário realizar um estudo com objetivo de minimizar os danos, onde é indispensável analisar a influência da geometria da ferramenta, do material e revestimento da broca, assim como a variação dos parâmetros de corte.

Este estudo busca obter informações que permitam realizar furos com boa qualidade. Para obter essas informações, serão realizados ensaios de furação em materiais compósitos com matriz poliéster e reforçados com fibra de vidro em matriz poliéster com sentido de orientação das fibras de $[0^\circ/90^\circ]$ e $[-45^\circ/+45^\circ]$. Para tanto, será utilizado um plano de laminação semelhante aos empregados na fabricação de embarcações de pequeno e médio portes, sendo essas placas laminadas manualmente com um fração volumétrica de 40% de fibra de vidro no laminado. Visando ampliar as informações e o conhecimento sobre o assunto, serão realizados ensaios de furação com diferentes tipos de brocas, isto é, com brocas que possuem diferentes geometrias, materiais e revestimento. Serão também empregados diferentes parâmetros de corte. Tal conjunto de variáveis visa determinar quais delas têm maior

influência na fabricação de furos em PRFV com menor nível de defeitos.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este estudo busca analisar a influência dos parâmetros de corte e as características das brocas na qualidade da superfície dos furos realizados pelo processo de furação, num material laminado com resina poliéster ortoftálicas e fibra de vidro tipo E, com duas opções de corpos de prova fabricados pelo processo de laminação manual.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A partir deste estudo busca-se identificar, compreender e correlacionar os efeitos causados pela variação dos parâmetros na qualidade da superfície dos furos, realizando ensaios de furação em materiais compósitos, utilizando diferentes parâmetros de entrada:

- Broca helicoidal de aço rápido, broca helicoidal de metal duro e broca com geometria alterada,
- Variação nos parâmetros de corte: velocidade de corte e avanço.
- Variação da orientação e das gramaturas das fibras de vidros nos corpos de prova.

1.3 CONTRIBUIÇÕES

O desenvolvimento desta pesquisa visa ampliar as informações sobre o processo de furação em materiais compósitos, assim sendo possível determinar a influência das variáveis sobre a obtenção de furos com menor nível de danos.

Na área naval este estudo visa contribuir para a redução do tempo gasto nos processos de montagem de uma embarcação. Com os resultados desta pesquisa pretendem-se obter furos com melhores qualidades de superfície, buscando assim reduzir os pós-processos, como escareamento e lixamento das rebarbas nos furos, além de melhorar a qualidade e a confiabilidade do produto final.

2 REFERENCIAL DE PESQUISA

Neste capítulo serão abordados temas como materiais compósitos e algumas de suas aplicações, fibras de vidros, tipos de fibras e suas composições, matriz poliéster e sua composição química e processo de laminação manual. Também será abordado o processo de furação, tipos e geometrias de brocas, parâmetros de corte além da qualidade dos furos produzidos, delaminação, fatores de delaminação e uma pesquisa sobre resultados anteriores.

Atualmente a frota brasileira de embarcações de esporte e recreio acima de 5 metros compreende um conjunto de aproximadamente 70.000 embarcações, entre lanchas e veleiros, assim fazendo com que a indústria náutica cresça e fique cada vez maior e mais forte no Brasil. (ACOBAR, 2012). A indústria náutica, em 99% dos casos, conta com a utilização da fibra de vidro do tipo E e resina poliéster para a fabricação dessas embarcações. A fabricação dessas embarcações é um processo geralmente artesanal ao invés de automatizado, como o utilizado na indústria automobilística, uma vez que necessita o emprego demorado de mão de obra (NASSEH, 2004 e FONSECA, 2005).

Há diferentes processos de fabricação relacionados à fabricação de embarcações de esporte e recreio, desde processos totalmente manuais como laminação manual até processos mais avançados como a infusão que conta com sistema automático de alimentação de resina e moldagem da peça por uma bolsa de vácuo (NASSEH, 2004). A escolha do material da embarcação, o tamanho da embarcação e as condições financeiras do fabricante são os fatores predominantes para escolha do processo a ser utilizado. Embarcações maiores e/ou fabricantes com mais recursos financeiros utilizam o processo de laminação por infusão. Normalmente, os fabricantes de embarcações de pequeno e médio porte utilizam laminação manual para fabricação de peças com materiais compósitos que serão abordados a seguir.

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Material compósito pode ser definido como uma mistura física de dois ou mais materiais, imiscíveis entre si, que são combinados para formar um novo material de engenharia constituído de duas ou mais fases e com propriedades físico e químicas diferentes daquelas dos materiais puros (TARGA, 2011). Os compósitos são formados por uma fase contínua e quase sempre em maior concentração volumétrica (matriz), que é responsável pela transferência da carga recebida para a

fase descontínua que por sua vez, confere resistência ao compósito quando submetido a algum tipo de esforço (RISSON *et al.*, 1998).

Segundo Gehlen (2014), nos materiais compósitos a matriz tem a função de envolver os constituintes do reforço e agregar forma a estrutura e rigidez aos compósitos, além de fornecer, resistência química e permitir qualidade de acabamento da superfície. No entanto, o reforço que é denominado como fase descontínua ou dispersa, tem a função de promover a resistência mecânica, rigidez e absorver as cargas mecânicas que o material compósito venha a receber.

Os compósitos são amplamente utilizados em diversas áreas, devido às suas características como: baixa densidade, baixo custo, propriedades mecânicas satisfatórias para aplicações estruturais, resistência química a diversos ambientes agressivos e facilidade de manutenção (RISSON *et al.*, 1998).

2.1.1 Classificação dos materiais compósitos

De acordo com Cavalcanti (2006), os compósitos podem ser classificados conforme a composição química ou a geometria e forma das partículas nas fases presentes. Os reforços na forma de fibras (longas ou curtas), partículas globulares, plaquetárias ou escamas podem ser incorporadas em matrizes dúcteis ou frágeis de maneira aleatória ou em laminados orientados, gerando compósitos com diferentes estruturas e propriedades.

Segundo Callister (2002), a classificação dos compósitos é basicamente dividida em três principais grupos, os reforçados com partículas, com fibras e os estruturais; cada um desses três grupos possui subgrupos. Uma representação simples para a classificação dos materiais compósitos está ilustrada na Fig. 1.

Os compósitos contendo a fase dispersa em forma de partículas são divididos em materiais reforçados com partículas grandes e reforçados por dispersão. Por outro lado, os materiais reforçados com fibras podem ser classificados em compósitos contendo fibras contínuas ou descontínuas. O primeiro subgrupo possui fibras orientadas paralelamente na matriz; enquanto que os compósitos com fibras descontínuas podem ser divididos em materiais reforçados com fibras orientadas em uma direção ou aleatoriamente distribuídas na matriz (FILHO *et al.*, 2009). O grupo dos compósitos estruturais é subdividido em laminados ou em sanduíches (CALLISTER, 2002).

Figura 1: Representação simples dos materiais compósitos.



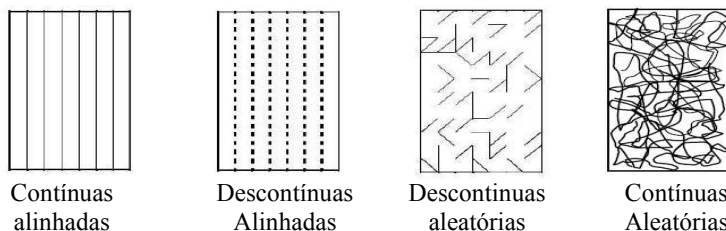
Fonte: Callister (2002).

No presente estudo o compósito desenvolvido será constituído por uma matriz polimérica formada por resina poliéster insaturada ortoftálica e por uma fase descontínua contendo fibra de vidro.

2.1.2 Compósitos poliméricos reforçados por fibras

Os materiais mais utilizados em aplicações estruturais são aqueles em que a fase dispersa encontra-se na forma de fibras, uma vez que a eficiência do reforço é maior para compósitos reforçados com fibras do que aqueles contendo partículas. (CALLISTER, 2002). As fibras podem ser contínuas ou descontínuas alinhadas ou com distribuições aleatórias podendo obter uma variedade de formas, conforme ilustradas na Fig. 2.

Figura 2: Esquema dos compósitos reforçados por fibras.



Fonte: Adaptado de Callister (2002) apud Targa (2011).

Os compósitos com fibras contínuas e alinhadas, conhecidos comercialmente como tecidos de fibras, possuem comportamento mecânico que depende do estado de tensão-deformação da fibra-matriz,

do percentual de cada fase, da direção das fibras e do valor da tensão aplicada (FILHO *et al.*, 2009).

De acordo com Targa (2011) e Ramos (2010), os materiais reforçados com fibras descontínuas aleatórias, também conhecidas comercialmente por manta de fibra, apresentam menor eficiência na resistência do compósito do que as fibras contínuas, porém essas oferecem maior facilidade de processamento e menor custo.

Segundo Callister (2002) e Almeida (2004), a transferência das cargas nas fibras é função de seu comprimento, sendo que seus extremos são pontos concentradores de tensão, que induzem tensões cisalhantes na interface.

As fibras utilizadas em reforços podem ser divididas em sintéticas e naturais. As fibras naturais, como no caso da madeira que são constituídas basicamente por celulose, hemicelulose, lignina, e outros compostos orgânicos e possuem fórmula e estrutura química complexa. Algumas de suas principais vantagens são: baixo custo, baixa densidade, facilidade de obtenção e manuseio, baixa abrasão de equipamentos. No entanto, possuem as desvantagens como: alta absorção de umidade, baixa resistência ao intemperismo, alta variabilidade de propriedades devido à sua origem natural (TARGA, 2011).

As fibras sintéticas mais utilizadas na construção naval com materiais sintéticos são as fibras de aramida, carbono e vidro. Os compósitos poliméricos contendo fibras sintéticas possuem elevadas resistências mecânicas, podendo ser aplicadas em diversas áreas. Entretanto, as fibras sintéticas possuem maior custo quando comparadas com as fibras naturais. EUROCOMP *apud* Almeida (2004) indica que as resinas poliésteres reforçadas com fibras de vidro são usadas desde o início dos anos 60 na fabricação de barcos, banheiras e painéis pré-fabricados para utilização em forros. Entre as fibras sintéticas, as fibras de vidro são as mais utilizadas e que possuem menor custo.

2.1.3 Fibra de vidro

As fibras de vidros possuem diversas composições, conforme ilustrado no Quadro 1 (NASSEH, 2004).

As propriedades físicas dos polímeros reforçados com fibras de vidro são influenciadas pela concentração e propriedades das fases presentes, bem como da composição da fibra e de suas características como, comprimento, diâmetro, distribuição, dispersão, orientação e interação na interface matriz/fibra.

Quadro 1: Composições químicas das fibras de vidro.

Composição	Concentração volumétrica (%)			
	Vidro A(%)	Vidro E (%)	Vidro S(%)	Vidro R(%)
SiO ₂	72,0	52,4	64,4	60,0
Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	1,5	14,4	25,0	25,0
CaO	10,0	17,2	-	9,0
MgO	2,5	4,6	10,3	6,0
Na ₂ O, K ₂ O	14,0	0,8	0,3	-
B ₂ O ₃	-	10,6	-	-

Fonte: Nasseh, 2004.

O Quadro 2 apresenta o efeito da composição das fibras de vidro nas propriedades mecânicas de compósitos com matriz de resina de poliéster insaturado.

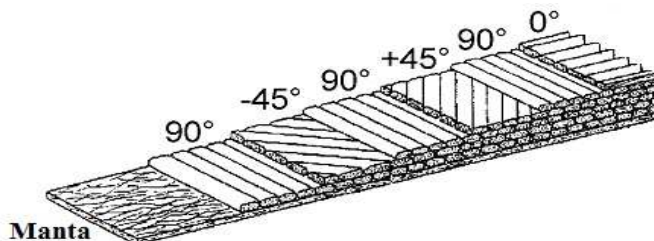
Quadro 2: Comparação da resistência mecânica entre vidro E e S.

Tipo	Fabricante	Resistência à tração	Módulo de	Densidade
		MPa (ksi)	elasticidade GPa (Msi)	(g/cm ³)
Vidro E	Corning	3450 (500)	72,5 (10,5)	2,54
Vidro S	Corning	4480 (650)	85,6 (12,4)	2,49

Fonte: Almeida (2004), alterado pelo autor.

Segundo Barbi (2011), as fibras descontínuas aleatórias são comercialmente chamadas de mantas, enquanto que as fibras contínuas, comercialmente chamadas de tecidos, podem ser alinhadas em diversas orientações, conforme ilustrado na Fig. 3.

Figura 3: Representação das orientações das fibras.



Fonte: Knops (2008), alterado pelo autor.

2.1.4 Matriz Polimérica

A principal função da matriz é unir as fibras umas com as outras e atuar também como transmissor de tensões distribuindo-as para as fibras. Denominam-se compósitos poliméricos, aqueles materiais que possuem a fase contínua (matriz) formada por um polímero (CALLISTER, 2002).

Segundo Cavalcante (2006), a matriz também tem a função de proporcionar a estética do compósito, além de proteger o reforço contra ataques químicos e físicos. A escolha da matriz polimérica dependerá do nível de deformação quando submetida a uma solicitação, da temperatura e condições em serviço. A deformação da matriz deve ser compatível com a deformação máxima do reforço.

Em compósitos poliméricos, podem ser utilizados como matrizes os polímeros termofixos, termoplásticos ou elastômero. Para as aplicações que necessitam maior resistência mecânica, utilizam-se geralmente polímeros termofixos, tais como resinas epóxi, fenólicas e poliéster (Hull e Clyne *apud* Cavalcante, 2006).

2.1.5 Resinas Poliéster

As resinas poliéster possuem como elementos fundamentais em suas cadeias moleculares os grupos de éster. Esses resultam da reação de condensação de um diol com um diácido, conforme o ácido empregado se obtém um poliéster saturado (termoplástico) ou insaturado (termofixo) (BLASS, 1988).

Os poliésteres saturados são obtidos pela reação entre um diol e um diácido saturado, cuja cadeia molecular é composta apenas por ligações simples entre átomos de carbono, além de possuírem moléculas longas e lineares, e não são sujeitos a reações de reticulação (Cavalcante, 2006). Os poliésteres insaturados podem ser divididos conforme as suas moléculas constituintes, sendo assim possível encontrar resinas de poliéster baseadas em ácido orto-ftálico, iso-ftálico ou tere-ftálico, além do bisfenol-A (IMAPES, 2007).

De acordo com IMAPES (2007), na resina de poliéster convencional, os grupos ésteres e as ligações carbono-carbono estão localizados ao longo da cadeia polimérica, e estão distribuídos aleatoriamente na rede após o polímero ter sido reticulado com estireno.

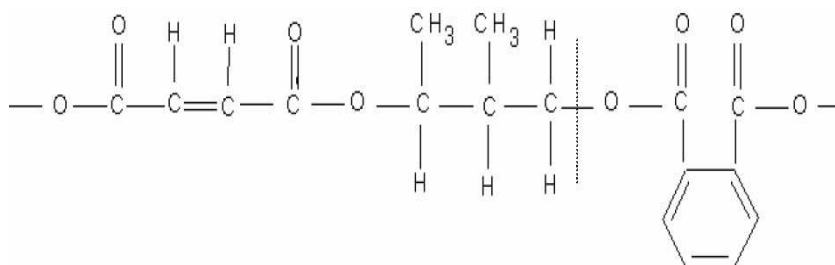
Serão discutidos a seguir a estrutura do poliéster insaturado, poliéster orto-ftálico e o processo de cura para compreender seus comportamentos, uma vez que, segundo Carnizelli (2011), atualmente a

maioria dos estaleiros que produzem embarcações em série utiliza resina poliéster insaturada ortoftálica, pois ainda são as economicamente viáveis para utilização em larga escala.

Estrutura do Poliéster Insaturado

A resina de poliéster insaturado é um polímero termofixo insaturado que possui em sua unidade de repetição grupos ésteres. Entre as resinas de poliéster insaturados, as mais utilizadas comercialmente são as ortoftálicas. De acordo com Gehlen (2014), as resinas ortoftálicas são geradas a partir do ácido ftálico e anidrido ftálico. As propriedades mecânicas e químicas das resinas ortoftálicas são inferiores às outras resinas de poliéster devido à dificuldade de obtenção de polímeros com alta massa molecular. A estrutura química da unidade de repetição de uma resina ortoftálica está representada na Fig. 4.

Figura 4: Estrutura química resina ortoftálica.



Fonte: Cavalcante, 2006.

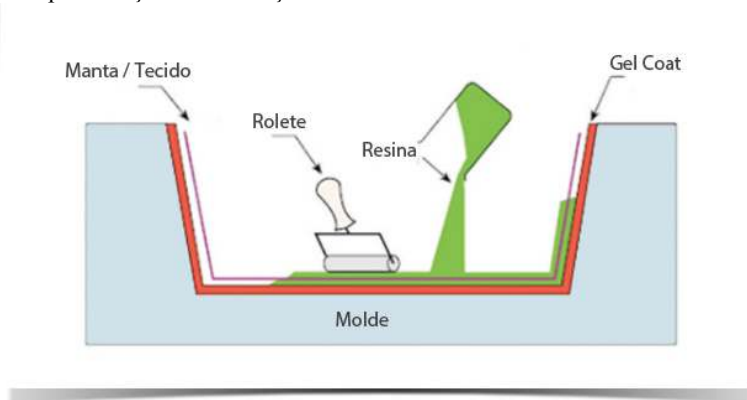
Reação de cura

A reação de cura é um processo caracterizado pela mudança da estrutura do polímero, a partir da formação de ligações cruzadas entre as cadeias e das propriedades físicas e químicas do material em questão. As variações de estrutura e propriedades ocorrem irreversivelmente, por intermédio de uma reação exotérmica (CAVALCANTE, 2006). Esta reação é realizada a partir do uso de iniciadores do tipo peróxido, sendo que o mais comumente usado é o peróxido de metil-etil-cetona (MECK) (Ferreira *et al.*, 2006; Revista Composites, 2010).

2.1.6 Processo de Fabricação

Há diversos métodos de fabricação para a obtenção de um material compósito. O método de laminação manual em molde fêmea é, sem dúvida, o método mais antigo e continua sendo hoje em dia, utilizado com maior frequência na produção de barcos de fibra de vidro (NASSEH, 2007; CALVOPÍÑA, 2013; BARRACUDA, 2014). O processo de laminação manual baseia-se em colocar vários reforços de fibras sobre um molde, e em seguida aplica-se a resina sobre as fibras. Normalmente, utiliza-se um rolete ou pincel para espalhar a resina sobre a camada de reforços de fibras, como ilustrado na Fig. 5 (NASSEH, 2008; TARGA, 2011).

Figura 5: Representação da laminação manual.



Fonte: Gonçalves (2010), adaptada pelo autor.

As peças de materiais compósitos fabricados a partir do método de laminação manual necessitam do processo de usinagem para sua fixação ou montagem. Um dos processos mais utilizados é a furação, que será descrito a seguir.

2.2 PROCESSO DE FURAÇÃO

Atualmente há um rápido e crescente desenvolvimento da tecnologia, assim sendo possível cada vez mais obter inovações e avanços tecnológicos em todas as áreas de atuação. Desta forma, há uma vasta gama de máquinas e ferramentas disponíveis no mercado para o processo de furação, como é o caso das brocas.

2.2.1 Geometria e nomenclaturas das brocas

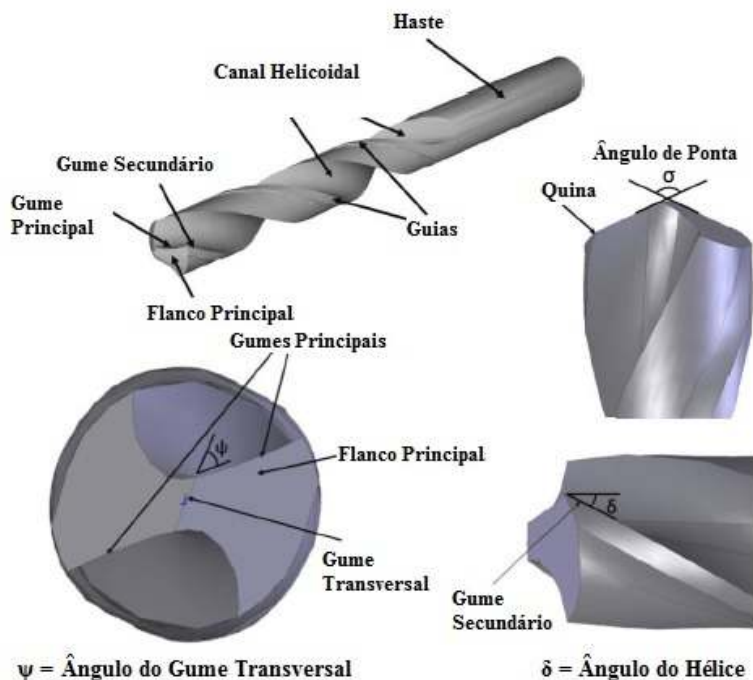
A geometria da ferramenta é um dos fatores que contribuem para a qualidade dos furos. A variação do ângulo de ponta, ângulo de incidência, ângulo de saída, entre outros, podem proporcionar diferentes resultados nos furos realizados. Também existem brocas com geometria especialmente desenvolvida para furação em materiais compósitos com intuito de reduzir os problemas com a delaminação e as rebarbas ao redor dos furos usinados (SANDVIK, 2011).

De acordo com Vikki (2011), a alteração no ângulo da ponta, ângulo de saída e o raio do gume contribuem substancialmente para reduzir possíveis defeitos na furação de materiais compósitos. Em seu estudo buscou analisar a variação do raio do gume e seus impactos na formação de rebarbas e delaminação dos furos em materiais compósitos.

É de suma importância saber identificar as diversas partes da broca, os ângulos e quais são as nomenclaturas empregadas para estes (Fig. 6). De acordo com Stemmer (1995) e Pinto (2010), as brocas helicoidais e suas partes são assim definidas:

- Haste - para a fixação da broca, executa-se na parte traseira uma haste cônica ou cilíndrica;
- Canal helicoidal - se encontra na ponta da broca e se estende até o comprimento útil da broca, e é destinado a criar espaço para remoção dos cavacos;
- Guias - para direcionar o furo e reduzir o atrito da broca furo;
- Gume principal - surge do encontro entre a face da ferramenta com o flanco primário.
- Gume secundário - é gerado pelo encontro da superfície do flanco secundário com a superfície da face da ferramenta.
- Gume transversal - situado na ponta da broca, liga entre si os dois gumes principais;
- Flanco - pode apresentar ângulo variável ao longo do gume principal, sendo interessante que este seja maior na quina da broca.
- Ângulo de Ponta (σ) - responsável pelo comprimento ativo do gume e sua variação aumenta ou diminui a espessura do cavaco

Figura 6: Partes básicas e detalhes da ponta de uma broca helicoidal



Fonte: Pinto (2010), adaptado pelo autor.

Existem diferentes tipos de afiação de pontas de brocas, sendo que alguns destes têm o objetivo de diminuir o calor gerado, melhorar a capacidade de centragem e ainda reduzir as forças de avanço. Existem também diferentes tipos de brocas para inúmeras aplicações (PINTO, 2010).

2.2.2 Tipos de brocas

Para abertura de furos empregam-se brocas, que podem ser de diferentes tipos: brocas chatas, brocas helicoidais, broca canhão, brocas ocas, entre outras. As brocas helicoidais, normalmente, são as mais utilizadas para a execução de furos (STEMMER, 1995).

Dentre os variados tipos de brocas existentes Durão *et al.* (2010), utilizaram seis tipos de brocas para diferentes aplicações como madeira e metais, conforme pode ser verificado na Fig. 7.

Figura 7: Diferentes tipos de broca.



Broca helicoidal ($\sigma = 120^\circ$).



Broca chata.



Broca helicoidal ($\sigma = 85^\circ$).



Broca escalonada.



Broca com ponta de centragem.



Broca escalonada helicoidal.

Fonte: Durão (2010), adaptado pelo autor.

Há diversos fabricantes de ferramentas que desenvolveram brocas especiais para furação de materiais compósitos, como por exemplo, a empresa Sandvik Coromat. Ela possui uma linha de brocas para furação em materiais compósitos, que foram desenvolvidas para realizar furos com mínimo de danos possíveis quando comparado com as brocas helicoidais convencionais (Fig. 8).

Figura 8: Brocas especiais para furação de materiais compósitos.



CORODRILL 452.1C



CORODRILL 854



CORODRILL 856

Fonte: Sandvik (2011), alterado pelo autor.

2.3 FURAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

Entre os diversos processos de usinagem, a furação tem uma posição relevante, devido à grande necessidade de realizar a ligação

mecânica entre duas peças através de rebites ou parafusos (GONÇALVES, 2010).

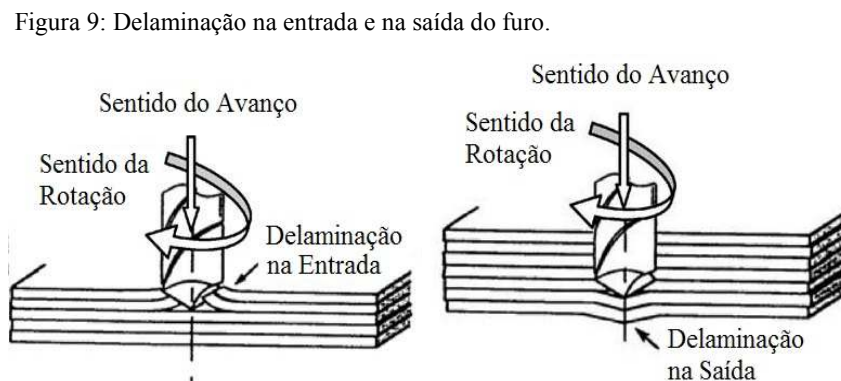
A delaminação é um dos principais problemas associados à furação de materiais compósitos reforçados com fibras. A redução ou inexistência da delaminação é de suma importância para manter a resistência mecânica e a vida útil da peça (KHASHABA, 2004).

Nos tópicos a seguir são descritos os fatores que causam a delaminação e alguns métodos utilizados por outros pesquisadores para quantificar os danos causados nos furos. Também foi realizada uma síntese sobre os trabalhos já publicados de alguns pesquisadores que abordam sobre o processo de furação em materiais compósitos, os parâmetros de processo, os métodos aplicados e os resultados obtidos.

2.3.1 Delaminação

A delaminação de um material compósito é uma situação em que ocorre uma falha entre as camadas que o compõe, podendo esta ser induzida pelo processo de furação. Além disto, a realização de um furo, normalmente, deixa rebarbas ao redor da sua borda causadas devido à falta de corte das fibras. Isso dificulta a união de peças por meio de parafusos ou rebites, pois será necessário que estas imperfeições sejam corrigidas para se evitar problemas em seu desempenho funcional em longo prazo (LIU *et al.*, 2012).

A Figura 9 mostra o mecanismo de delaminação na entrada e na saída dos furos além do sentido do avanço e da rotação da broca.



Fonte: Khashaba(2004) adaptado pelo autor.

Sobre a delaminação Khashaba (2012) afirma que no início da furação a ponta da broca faz contato com o laminado, sendo que a força de corte agindo na direção periférica, é a força motriz para que ocorra a delaminação. A geometria da ponta tende a afastar as lâminas superiores do material antes que ele seja completamente usinado. À medida que a broca se aproxima do fim, a espessura do material não cortado fica menor e a resistência à deformação diminui. Em algum momento, a força de empuxo supera a resistência de união interlaminar causando delaminação (KHASHABA, 2012).

DURÃO *et al.* (2006) afirmam que a delaminação na entrada é causada pelo contato da broca e a peça, que em consequência do avanço da ferramenta, o material tende a ser puxado para cima ao longo do canal da broca em vez de ser cortado. Devido a este efeito as camadas superiores do material se separam das demais camadas da placa. No entanto, a delaminação na saída do furo é consequência da força compressiva que a broca exerce sobre a peça. As camadas do laminado que se encontram abaixo da broca tendem a ser separadas das camadas superiores, fraturando as ligações interlaminares na região à volta do furo. Se, num dado instante, a força gerada pela broca se torna superior à resistência interlaminar da placa, ocorre a delaminação, antes que o laminado seja totalmente usinado.

O próximo tópico descreve e correlaciona os métodos desenvolvidos por outros pesquisadores que visam quantificar a delaminação dos furos.

2.3.2 Métodos para quantificar a delaminação

Devido à delaminação ser algo tão crítico quando se trata de furação em materiais compósitos, foram criados alguns métodos que visam quantificar os danos nos furos realizados. Alvarez *et al.* (2013) afirmam que a quantidade de delaminação é medida através do fator de delaminação. Existem várias abordagens que visam quantificar a superfície danificada, que com o passar do tempo foram evoluindo, o que possibilitou melhor caracterizar a delaminação nos furos.

Foi realizado um estudo comparativo entre quatro métodos que visam quantificar os danos dos furos. As nomenclaturas, as equações e uma ilustração para melhor compreender os métodos seguem no Quadro 3. As descrições sobre o conteúdo do quadro seguem abaixo conforme as referências.

Davim *et al.* (2003) inicialmente caracterizam o fator de delaminação (Fd) como sendo a razão entre o diâmetro máximo da área

danificada ($D_{\text{máx}}$) com o diâmetro da ferramenta (D_0). Khashaba (2004) caracteriza em seu estudo o fator de delaminação como sendo a diferença entre raio máximo delaminado ($R_{\text{máx}}$) e o raio da ferramenta (R), assim denominando-o como (D_s).

Davim et al. (2007) desenvolveram um método que denominaram como fator de delaminação ajustado (F_{da}), o qual considera a influência da área danificada, onde (A_d) é a área danificada, ($A_{\text{máx}}$) é a área da circunferência calculada através do diâmetro máximo danificado ($D_{\text{máx}}$) e (A_0) é a área da circunferência calculada através do diâmetro da broca (D_0).

Alvarez et al. (2012), em seus estudos, propuseram uma metodologia para cálculo do fator de delaminação que denominaram como fator de delaminação proposto (F_{dp}), o qual leva em consideração o cálculo do diâmetro equivalente (D_{eq}), onde “ n ” é o ângulo da região danificada, medida desde o centro do furo; “ m ” é número de picos e vales dentro da região delaminada, que é definida pelo ângulo (α_n) ($D_{p\text{máx}}$) é o diâmetro do pico e ($D_{p\text{mini}}$) é o diâmetro do vale. Eles também utilizam ($D_{\text{máx}}$) como sendo o diâmetro máximo da área delaminada e (D_0) como diâmetro da broca.

Dentre os métodos estudados Davim *et al.* (2007) e Alvarez *et al.* (2012) são os dois métodos que melhor caracterizam os danos nos furos, pois ambos os métodos consideram a área danificada e não somente uma razão entre diâmetros máximo danificado e o diâmetro da broca.

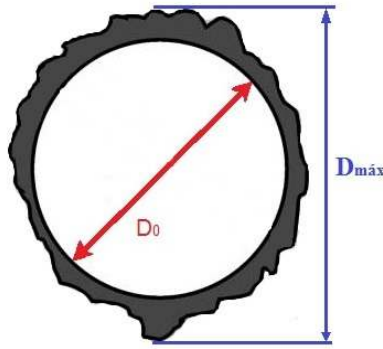
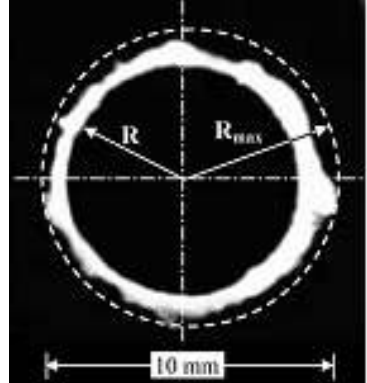
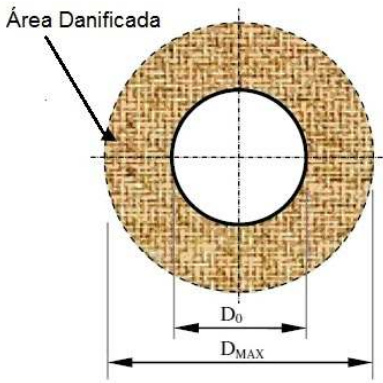
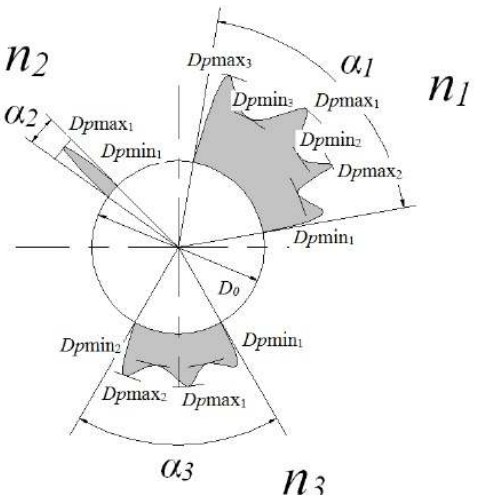
O tópico a seguir abordará alguns trabalhos realizados por outros autores relacionados a este estudo, buscando um banco de informações para determinar as variáveis deste estudo.

2.4 PESQUISA E RESULTADOS ANTERIORES

Materiais compósitos, principalmente os laminados com fibras, possuem grandes dificuldades de serem usinados devido às suas propriedades anisotrópicas, sendo difícil determinar um padrão de usinagem.

Sendo assim, foi necessário reunir trabalhos anteriores para compreender as variáveis envolvidas. No entanto, qualquer mudança, seja no tipo de fibra utilizado, fração volumétrica de fibra no laminado, parâmetros de corte ou nas diferentes geometrias das ferramentas, pode interferir nos resultados. O Quadro 4, apresenta a comparação entre alguns resultados relacionados a esta pesquisa.

Quadro 3: Comparativo entre métodos para quantificar a delaminação.

Método	Referência	Equação	Ilustração
Fd	Davim <i>et al.</i> (2003)	$F_d = \frac{D_{max}}{D_0} \quad (1)$	
Ds	Khashaba (2004)	$Ds = R_{max} - R \quad (2)$	
Fda	Davim <i>et al.</i> (2007)	$F_{da} = F_d + \frac{A_d}{(A_{max} - A_0)} (F_d^2 - F_d) \quad (3)$	
		$A_{max} = \pi \cdot \frac{D_{max}^2}{4} \quad (4)$	
		$A_0 = \pi \cdot \frac{D_0^2}{4} \quad (5)$	
Fdp	Alvarez <i>et al.</i> (2012)	$F_{dp} = F_d + \frac{D_{eq}}{(D_{max} - D_0)} (F_d^2 - F_d) \quad (6)$	
		$D_{eq} = \sum_{i=1}^n \omega_n x_n \quad (7)$	
		$\omega_n = \frac{\alpha_n}{2\pi} \quad (8)$	
		$x_n = \sum_{i=1}^m \left(\frac{Dp_{max}_m}{2m} + \frac{Dp_{min}_m}{2m} \right) \quad (9)$	

Quadro 4: Comparativo entre trabalhos anteriores.

Referências	Objetivo da pesquisa	Material dos Corpos de prova	Ferramentas	Parâmetros de corte	Síntese dos resultados obtidos
Babu <i>et al.</i> (2013)	Avaliar a influência e a otimização da variação dos PC em um mesmo furo sobre o Fd, através de um método Taguchi e ANOVA.	GFRP – Vidro E Resina Epóxi 26 camadas de tecido UD [0°/90°] t 6mm.	Fresa Ø 10mm.	f (mm/mim) 50; 100; 200; 300; 400. v_c (m/mim) 31; 47; 63; 79; 94.	Os valores máximos e mínimos para velocidade de avanço e v_c não proporcionaram bons Fd. Através da análise da variância dos resultados o autor afirma que o avanço é a variável que têm a maior influência no Fd. Segundo os resultados o PC ótimo para esse estudo são $v_c=79\text{m/mim}$ e velocidade de avanço de 100mm/mim.
Budan <i>et al.</i> (2011)	Avaliar a influência da variação do Fv e da quantidade de furos em relação a rugosidade (Ra, Rt, Rz), desgaste da ferramenta e Fd.	GFRP – Vidro E Resina Epóxi Tecido cruzado t 8mm Fv – 30; 40; 50; 60 e 70 %.	BH / HSS σ 118° Ø 8 mm. Foram analisados os furos números 10, 20, 40 e 55.	f (mm) 0,076. v_c (m/mim) 12.	Os corpos de prova com Fv de 70% não foi analisado, devido a sua grande rugosidade e nem Fd, devido a resultados muito ruins. A rugosidade e o desgaste da broca aumentam conforme se realizam mais furos e o conforme aumenta o Fv. O Fd piora aproximadamente 12% entre cada na variação de Fv, sendo que quanto maior o Fv pior o resultado e maior o desgaste da broca.
Durão <i>et al.</i> (2010)	Comparar a variação da GF e PC e suas influências nas forças axial e Fd. Realização de um ensaio de tração após a furação para correlacionar a influência Fd nas PM	CFRP – Resina Epóxi. [0°/90°] seis camadas tecido pré impregnado Curado numa prensa com 300kPa a 130°C T 3,8 mm.	2 BH σ 120° / 85°; BC σ 30°; Brad; BD e BD Helicoidal (Ø 1,5-6 mm). Todas as brocas MD K20 Ø 6mm	f (mm) 0,02; 0,06; 0,12. v_c (m/s) 53.	As menores forças foram obtidas pela BC e as maiores pela BH σ 120°. Para obtenção dos menores Fd recomenda-se utilizar o $f=0,02\text{mm}$ com a BH σ 120°. A realização de ensaios de tração após a furação teve uma perda de 10% na resistência atração onde o Fd variou de 1,12 a 1,23. O f é o fator que acarreta maior influência no aumento das forças e do Fd.
Feito <i>et al.</i> (2014)	Visam a analisar a influência do ângulo de ponta, o desgaste da broca e a variação dos PC nas FE e no Fd entrada e saída.	CFRP – FV 55,3 % Resina Epóxi. 10 camadas com mesma orientação, t 2,2 mm.	3 BH / MD Ø 6 mm σ 90°; 118°; 140°.	f (mm) 0,05; 0,1; 0,15. v_c (m/mim) 25; 50; 100.	O Fd na entrada diminuiu com a progressão do desgaste, no entanto aumentou em Fd na saída. Ao considerar a mesma situação de desgaste as brocas obtiveram o mesmo Fd. Os resultados mais favoráveis em relação à Fd e FE foram obtidos com o menor valor do ângulo de ponta e menor avanço.
Jayabal <i>et al.</i> (2010)	Buscaram determinar através da ANOVA o nível de importância da variação dos PC, σ e suas interações e a influência que estes têm em FE FT e Fd.	GFRP – Vidro E Resina Poliéster t 3 mm. resistência à tração de 307MPa e resistência a flexão de 195MPa.	3 BH / HSS σ 90°; 104°; 118° Ø 6 mm.	f (mm) 0,1; 0,2; 0,3. v_c (m/mim) 11; 23; 34.	Para obter menores valores para FT e FE é necessário utilizar os menores f e v_c . Através do ANOVA identificou-se que o responsável pelo aumento de FT é a interação entre ($f \times \sigma$) e ($f \times v_c$). A interação entre ($f \times v_c$) é a variável que tem maior influência no aumento de FE. O maior Fd foi obtido com os mesmos PC que obtiveram o maior FE e FT.

Referências	Objetivo da pesquisa	Material dos Corpos de prova	Ferramentas	Parâmetros de corte	Síntese dos resultados obtidos
Karimi <i>et al.</i> (2012)	O Método Taguchi foi utilizado para organizar as variáveis f , v_c e σ , para analisar a FE, Fda e a resistência à tração residual no processo de furação.	GFRP – Vidro E Tecido com 292g/m ² , Resina Poliéster, Fv 50% t 5mm	3 BH / HSS σ 90°; 110°; 130° Ø 4 mm.	f (mm) 0,025; 0,05; 0,1. v_c (m/mim) 4; 8; 13.	Os menores Fda e FE foram obtidos com $f=0,025$ mm, $v_c=4$ m/mim e σ 90°, no entanto com esses mesmos parâmetros se obteve a maior tensão residual, ou seja, Fda e FE têm uma correlação linear positiva enquanto Fda e tensão residual têm uma correlação linear negativa. O f seguido do σ são os parâmetros que mais influenciam nos resultados.
Khashaba ¹ (2010)	Analisar as influências da variação do diâmetro da broca e PC nos valores de Fd entrada e de saída, na rugosidade e na FE.	GFRP – Fv 35% Resina Epóxi, 25 camadas t 8,3 mm. resistência à tração de 204 MPa e 16 GPa de ME.	BH / MD σ 120° Ø 8 mm. BH / MD σ 120° Ø 13 mm.	f (mm) 0,06; 0,11; 0,22; 0,32; 0,45. v_c (m/mim) 6,4; 12,7; 20,3; 32; 50,6.	A broca Ø 8mm induz aproximadamente 35% a menos na FE, que a outra broca. As duas brocas obtiveram menores delaminação e melhor acabamento de superfície com menor f , no entanto a variação da v_c não teve grande influência. O alto teor de correlação entre FE e PC confirma que é importante a redução das FE na furação de GFRP.
Kilickap (2010)	Otimizar os parâmetros de processo e determinar suas influências para obter menor Fd. Para realizar estes foi utilizado o Método Taguchi e ANOVA.	GFRP – vidro E Resina Epóxi t 10 mm, 240MPa de Resistência tração 25 GPa de módulo de elasticidade.	BH / HSS / σ 118°; BH/HSSE /TiN σ 135° BH Brad / HSS BH Step / HSS σ 118° / Step 90°. Ø 7 mm.	f (mm) 0,1; 0,2; 0,3; 0,4. v_c (m/mim) 5; 10; 15; 20.	Com base nos resultados ANOVA para se obter furos com mínimo de fator de delaminação tanto na entrada quanto na saída dos furos é necessários utilizar $f=0.01$ mm e $v_c=5$ mm/mim. O design Taguchi desse estudo pode ser utilizado para identificar os melhores PC. Os furos realizados com as brocas Step obtiveram os menores Fd seguido das brocas Brad, 118° e 135°.
Kishore <i>et al.</i> (2009)	Buscaram reduzir o torque e FE, buscando melhor o acabamento de superfície e da delaminação. Para este estudo foi utilizado o Método Taguchi e ANOVA.	GFRP – Vidro E Fv 60% Resina Epóxi [(0°/90°)/0°].	BH / HSS Ø 8 mm 8 faces 4 faces Jodril.	f (mm/mim) 10; 15; 20. V_c (m/mim) 19; 38; 57.	A menor FE foi com $v_c=57$ mm/mim, e velocidade de avanço de 10 mm/mim. Testes de confirmação foram realizados para verificar as condições ideais previstas, os valores registrados e a estimativa ficaram muito perto um do outro. O menor Fd foi obtido com a broca 8 faces com velocidade de avanço de 20mm/mim e V_c de 19mm/mim.
Krishnaraj (2008)	Analisar a influência GF e PC e suas influências sobre a força de empuxo, fator delaminação, rugosidade e circulariedade dos furos.	GFRP - espessura e Fração volumétrica de fibra não informado.	BH - padrão Múltiplas Faces Zhiron Ø 10 mm.	f (mm) 0,02; 0,03; 0,04; 0,05. v_c (m/mim) 16; 31; 47;63; 440; 518; 597.	As três brocas obtiveram menores FE com alta v_c e baixo f . Em relação a Fd as três brocas tiveram melhores resultados em baixo v_c e f . Quanto a rugosidade a broca MF e Zhiron teve uma variação máxima de 4 a 8 μ m e a BH 5 a 15 μ m conforme aumenta PC. A circulariedade e o diâmetro não tiveram uma variação significativa com relação à variação PC.

Referências	Objetivo da pesquisa	Material dos Corpos de prova	Ferramentas	Parâmetros de corte	Síntese dos resultados obtidos
Lazar <i>et al.</i> (2011)	Analisar a variação dos PC, GF, e material sobre as forças axial, de torque e empuxo, buscando peças com boa qualidade de superfície.	CFRP – Fv 60% GFRP – Fv 60 a 70%. [0°/90°], Resina Epóxi. PM – vide artigo referência.	MD / E-90° Ø 5,55 mm. MD / 8 faces Ø 5,36 mm. MD / BH Ø 5,6 mm.	f (mm) 0,02; 0,08; 0,14; 0,20. v_c (m/mim) 9; 28; 48; 67; 86.	O CFRP tem PM superiores a GFRP, porém sua usinabilidade é semelhante. A FE tem uma variação máxima, para todas as condições testadas de 3% maior para CFRP do que GFRP, enquanto a FT tem variação máxima de 20% a mais para GFRP. A broca de 8 faces proporcionou em geral menores forças do que E-90° e BH, esses bons resultados é devido a sua geometria.
Mohan <i>et al.</i> (2007)	Através do Método Taguchi, S/N ratio e ANOVA analisar quais parâmetros de processo e suas combinações têm maior influenciam na qualidade do furo produzido.	GFRP – Vidro E Fv 63% Resina Poliéster t 3; 6; 9; 12 mm.	4 BH MD revestido Ø 3; 6; 9; 12 mm.	f (mm/mim) 50; 75; 100; 125; 150. rotação (rpm) 600; 900; 1200; 1500.	Com base no S/N ratio, os parâmetros ideais para o mínimo de Fd na entrada são o $f=50$ mm/min, a rotação de 1.200rpm, Ø de 6mm e a t do material com 12 mm. Do mesmo modo que os parâmetros ótimos para menor Fd na saída são: $f=50$ mm/min, rotação de 600rpm, o Ø de 10 mm e o material com t de 10mm.
Nobre <i>et al.</i> (2013)	Utilizar HENM e o FEM para determinar a tensão induzida e residuais no processo de furação em materiais compósitos.	GFRP – Resina Epóxi, [-45°/45°] 8 camadas com t 375µm por camada.	Fresa Ø 1,6 mm.	f (mm/mim) 0,01. v_c (m/mim) 50; 1056.	As curvas de relaxamento de tensão foram posteriormente comparadas com os simulados numericamente usando FEM. A comparação direta entre as curvas experimentais e numéricas levou à determinação das tensões residuais induzidas por furação. Essas tensões foram maiores para a furação CNCMM.
Patil <i>et al.</i> (2014)	Analisar a influência da variação de fibra e materiais de enchimento, tempo de imersão. (8, 16 e 24h) na água do mar sobre a FE e Fd.	GFRP – Vidro E Fv 60, 59, 58, 57 Resina Epóxi 40% 1, 2 e 3% de TiO ₂ 1, 2 e 3% ZnS.	BH Step / HSS, σ 118° Ø 12/8 mm Ø 10/6 mm Ø 8/4 mm.	f (mm) - rotação (rpm) 525; 1625; 2650.	A broca 12/8 obteve piores Fd para todas as amostras estudadas, no entanto as brocas 10/6 e 8/4 tiveram os mesmo resultados não havendo uma influencia significativa dos PC. Quanto menor os diâmetros da broca e maior a rotação menor FE. Conforme o tempo de imersão aumenta, FE também aumenta. O material sem os complementos de TiO ₂ e Zns mostrou piores resultados.
Rubio ¹ <i>et al.</i> (2007)	Tratar as imagens digitais com filtros para obter uma melhor caracterização dos danos e determinar um novo parâmetro para Fd.	GFRP – Fv 50% Resina Epóxi, tecido 200g/m ² 10 camadas [0°/90°] t 3 mm.	BH / HSS σ 118° Ø 5 mm. Furação Submersa com água.	f (mm) 0,04; 0,10; 0,15; 0,20. v_c (m/mim) 55; 71; 86.	Os menores Fd foram obtidos com a utilização dos menores f , no entanto a furação com maiores v_c danificou mais a região ao redor do furo. Com os resultados obtidos conclui-se que é necessária a utilização de um parâmetro híbrido que contemple tanto o comprimento quando a região danificada ao redor do furo.
σ – Ângulo de Ponta f – Avanço Ø – Diâmetro da broca t - Espessura ANOVA – Análise de Variância	BC – Broca Chata BD – Broca diametral BH – Broca Helicoidal CFRP – Polímero reforçado com fibra de carbono FE – Força de Empuxo	E – 90° - Broca especial compósitos Fd – Fator delaminação Fda - Fd (ajustado) FEM -Finite element method FT – Força de torque Fv – Fração volumétrica	GF – Geometria da ferramenta GFRP – Polímeros reforçado com fibra de vidro HENM - <i>hybrid experimental numerical methodology</i> HSS – Aço Rápido	HSSE – HSS com alto teor Vanádio MD – Metal Duro ME – Módulo de Elasticidade MF – Múltiplas Face	PC – Parâmetros de corte PM – Propriedades mecânicas UD – Unidirecional Vc – Velocidade de corte.

Fonte: De acordo com as referências adaptado pelo autor.

Os estudos anteriores resumidos no Quadro 4 comprovam que os materiais compósitos, principalmente os laminados com fibras, possuem grandes dificuldades de serem usinados, e nota-se que a variação dos parâmetros de processo tem influência sobre os resultados obtidos. Qualquer mudança nos parâmetros de entrada, seja no tipo e a fração volumétrica de fibra do laminado, avanço, velocidade de corte ou nas geometrias e tipos de ferramentas utilizadas, todos esses têm uma pequena ou grande influência que proporcionam diferentes resultados nos furos realizados.

A usinagem em materiais compósitos tem recebido a atenção de muitos pesquisadores, principalmente devido aos defeitos que o processo de usinagem produz na peça. No processo de furação os principais defeitos encontrados nos furos usinados são: a área danificada ou delaminada ao redor do furo, tanto na saída quanto na entrada, rebarbas geradas por falta de total ruptura das fibras, defeitos de circularidade e no diâmetro do furo (Davim *et al.*, 2004; Brinksmeier *et al.*, 2011). Alguns desses problemas podem ser evitados ou diminuídos, quando se consegue caracterizar sua origem. Normalmente o avanço, a velocidade de corte e geometria da ferramenta são as variáveis que têm maior influência nos defeitos dos furos (KHASHABA² *et al.*, 2010).

Na utilização de brocas helicoidais com geometria convencional para a furação em materiais compósitos deve-se ter precauções com a escolha dos parâmetros de corte, pois o avanço é o parâmetro de corte que tem a maior influência sobre o fator de delaminação. Normalmente conforme se aumenta o avanço se aumenta a área danificada ou delaminada (DAVIM *et al.*, 2004; RUBIO² *et al.*, 2007).

Com as informações obtidas nas pesquisas de trabalhos anteriores, é possível extrair informações para embasar quais os valores das variáveis a serem escolhidas para a presente pesquisa. Também com essas informações definir as metodologias a serem aplicadas para condução dos ensaios de furação, e a organização das variáveis dos experimentos. Todas essas variáveis a serem analisadas no presente estudo serão melhor detalhadas no próximo capítulo.

3 MATERIAIS, MÉTODOS E EQUIPAMENTOS

Para a realização dos ensaios de furação em materiais compósitos visando minimizar os danos ao redor dos furos necessita-se controlar e correlacionar o maior número de variáveis de processo. Neste capítulo são detalhadas todas as etapas dessa pesquisa, tais como: escolha do material dos corpos de prova, processo de fabricação das amostras, cálculo da fração volumétrica de fibra, ensaios de tração e impacto. Também são caracterizados os processos de furação, escolha dos parâmetros de corte, tipos de brocas, equipamentos utilizados, aquisição das imagens dos furos, a metodologia empregada para o cálculo do fator de delaminação, além do uso de um software estatístico para organizar todas as variáveis desta pesquisa.

3.1 CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova desse estudo foram fabricados em parceria com a Universidade do Vale do Itajaí, onde se utilizou o espaço físico do Laboratório de Construção Naval para a fabricação dos corpos de prova. Quando se pensou na fabricação dos corpos de prova, uma das principais características desejadas foi torná-los o mais próximo das características da situação real de uma embarcação de médio porte.

Devido a isso os corpos de prova foram fabricados seguindo os tipos de materiais, plano de laminação e o processo de laminação aplicado na fabricação desses tipos de embarcações, conforme descritos a seguir.

3.1.1 Materiais dos corpos de prova

Devido à vasta gama de tecidos de fibras de vidro do tipo E existente no comércio foram escolhidos os materiais que são usados com maior frequência entre os fabricantes de embarcações de médio porte. Esses tecidos de fibra de vidro podem ser combinados em diferentes gramaturas e tipos de fibra. Conforme estudado no capítulo anterior as fibras podem ser contínuas ou descontínuas e orientadas ou desorientadas. Para a fabricação dos corpos de prova foram utilizados três diferentes tipos de tecido:

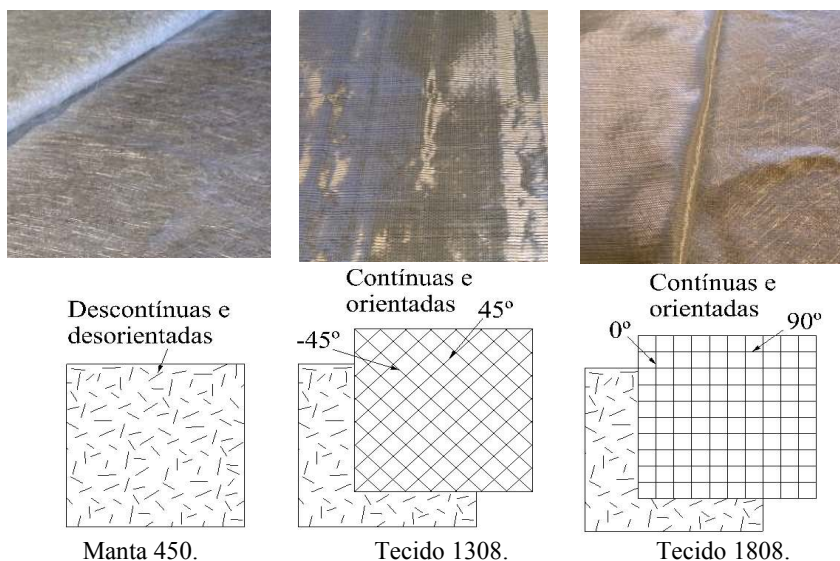
- Tecido descontínuo e desorientado: Este é comercialmente chamado de manta. A manta possui fios de fibra curtos e ordenados aleatoriamente, unidos por um material ligante que se dissolve quando entra em contato com a resina. Esta manta

possui uma gramatura de 450g/m^2 . Este material será denominado neste estudo como “manta 450”.

- Tecido contínuo e orientado $[-45^\circ/45^\circ]$: Este material é constituído por dois tecidos contínuos e cruzados, sendo que cada um deles pesa 228g/m^2 , e estando orientados entre si a 45° e -45° . Além disso, são unidos com uma manta de 275g/m^2 através de costura, totalizando assim um material com 731g/m^2 , que nessa pesquisa será chamado como comercialmente é conhecido “tecido 1308”.
- Tecido contínuo e orientado $[0^\circ/90^\circ]$: Este tecido é formado por dois tecidos contínuos e cruzados, sendo que um tecido é orientado a 0° e o outro a 90° , cada um deles pesando 300g/m^2 . Além disso, são unidos com uma manta de 275g/m^2 através de costura, totalizando assim um material com 875g/m^2 que também será chamado pelo seu nome comercial, ou seja, “tecido 1808”.

A Fig. 10 foi elaborada para melhorar a compreensão do sentido das orientações e os tipos de fibra utilizados nesse experimento.

Figura 10: Detalhamento das fibras de vidro.



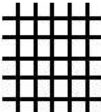

Fonte: Autor.

Os corpos de prova foram compostos pela combinação de várias camadas de fibras de vidro para obter a espessura desejada. O plano de laminação visa organizar a quantidade e a sequência das camadas de fibras que serão dispostas sobre o molde para serem laminadas.

Foram considerados dois planos de laminação para os corpos de prova: Opção A e a opção B, cada um deles representados por um símbolo para facilitar a identificação no decorrer deste estudo, conforme apresentado no Quadro 5.

Cada plano de laminação possui diferentes números de camadas e tipos de tecidos, assim obtendo-se dois tipos de corpos de prova, com diferentes propriedades mecânicas, devido à gramaturas e às orientações das fibras.

Quadro 5: Planos de laminação dos corpos de prova.

Nº de camadas	Opção A	Símbolo opção A	Opção B	Símbolo opção B
1	Manta 450		Manta 450	
2	Manta 450		Manta 450	
3	Manta 450		Manta 450	
4	Tecido 1808		Tecido 1308	
5	Tecido 1808		Tecido 1308	
6	Tecido 1808	[0°/90°]	Tecido 1308	[-45°/45°]
7	-		Tecido 1308	

Fonte: Autor.

Determinados os planos de laminação e a quantidade de fibras a serem utilizados, decidiu-se utilizar a resina de poliéster como matriz polimérica, por ser esta a mais empregada para a fabricação de embarcações, devido ao seu menor custo, maior facilidade de aplicação e baixa viscosidade. Para fabricação dos corpos de prova deste estudo, foi utilizada a resina poliéster ortoftálica cedida pela empresa CCP Compósitos, que requer aproximadamente 1% de iniciador “MEKP 50” para que se inicie sua reação de endurecimento.

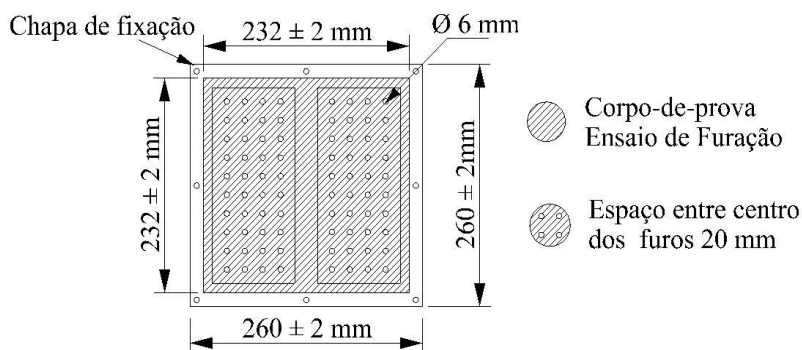
Após a determinação da quantidade de reforços de fibras e a matriz polimérica, é necessário quantificar o número de corpos de prova e suas dimensões para se obter um melhor aproveitamento dos espaços sobre o molde para evitar desperdício, pois estes materiais necessitam de um descarte especial, para evitar a contaminação do meio ambiente.

3.1.2 Dimensões dos corpos de prova

Os corpos de prova foram dimensionados para que fosse possível realizar 80 furos, divididos em dois grupos de 40 furos cada.

Considerando-se que o espaçamento entre os centros de cada furo seria de 20mm, mais o diâmetro da broca somados ao espaço necessários para fixar os corpos de prova, determinou-se que cada um deles deveria formar chapas quadradas com dimensões de aproximadamente 230mm, como está representado na Fig. 11.

Figura 11: Representação dos furos e chapa de fixação.



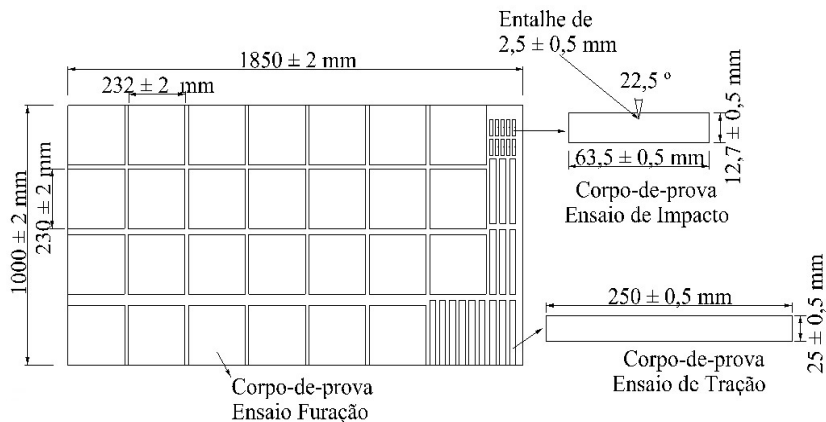
Fonte: Autor.

Para a determinação das dimensões dos corpos de prova para os ensaios mecânicos, foi necessário manter um padrão internacional para que estes resultados pudessem ser comparados com os resultados de outros estudos. Foram utilizadas as normas ASTM D3039 para os ensaios de tração e da ASTM D256 para os ensaios de impacto, sendo que as dimensões destes corpos de prova estão apresentadas na Fig. 12, que também mostra a distribuição de todos os corpos de prova necessários para este estudo.

Primeiramente os corpos de prova foram fabricados sobre uma chapa de vidro plana (molde) com dimensões de 1m x 1,85m, visando facilitar o processo de laminação, além de tentar manter mesma espessura, e a mesma fração volumétrica de fibra no laminado. Deste laminado foram retirados 27 corpos de prova (230mm x 260mm), além de 15 corpos de prova para ensaios de tração e 10 corpos de prova para ensaios de impacto, cujas dimensões podem ser verificadas através da Fig.

12. Após o tempo de cura de 72 horas, esta placa foi desmoldada e usinada nos tamanhos desejados.

Figura 12: Representação da extração dos corpos de prova da chapa laminada.



Fonte: Autor.

3.1.3 Fabricação dos corpos de prova

No processo de laminação manual, as ferramentas utilizadas foram um rolo de lã, um rolete de aço carbono (Fig. 13A), além de uma balança e um recipiente para colocar a resina. Antes de se iniciar o processo de laminação iniciou-se a preparação dos moldes. Como se pretendia testar dois planos de laminação diferentes foi necessária a utilização de duas chapas de vidro (moldes), com a finalidade de manter as mesmas condições de temperatura e umidade do ambiente, para os corpos de prova. Estes moldes foram colocados sobre mesas niveladas para garantir uma superfície sem estar empenada, como mostra a Fig. 13B. Os vidros receberam um tratamento impermeabilizante onde foram aplicadas 8 demãos de cera para garantir que o material laminado não aderisse aos moldes.

Após o tratamento dos moldes, os tecidos e as mantas foram cortados no tamanho do molde e na quantidade de camadas necessárias (Fig. 13C), seguindo-se as especificações de cada um dos dois planos de laminação. O processo de corte de material antes do início da laminação é necessário para evitar perde de tempo, pois a resina utilizada neste experimento inicia o processo de polimerização passado entre 15 a 20 minutos após a adição de 1% de iniciador.

Com todos os materiais já cortados iniciou-se a impregnação das fibras de vidro com resina sobre o molde, como mostra a Fig. 13D. As camadas de fibra foram empilhadas e impregnadas uma a uma, conforme pode ser observado na Fig. 13E.

Figura 13: Processo de laminação.



A: Rolo de lã e Rolete de aço carbono.



B: Molde nivelado e encerado.



C: Corte das camadas de fibras.



D: Aplicação da resina.



E: Nova camada de fibra.



F: compactação com rolete.

Fonte: Autor.

Com o término da impregnação das fibras de vidro com a resina, iniciou-se uma importante etapa que é a compactação das camadas, com a finalidade de eliminar as bolhas de ar que estão entre as fibras, além de garantir uma melhor compactação do material. Para esta finalidade, utilizou-se o rolete (Fig.: 13F). Outros processos utilizam bolsas de vácuo ou contra moldes para exercer essa mesma função.

Os corpos de prova ficaram sobre os moldes por um período de aproximadamente 72 horas a temperatura ambiente, antes de serem desmoldados e usinados nos tamanhos e nas quantidades dos corpos de provas desejados, como mostra a Fig. 12.

3.2 PROCESSO DE FURAÇÃO, MÁQUINA E FERRAMENTAS

Terminadas a confecção e preparação dos corpos de prova, fez-se necessário caracterizar e determinar as variáveis envolvidas no processo de furação, tais como tipos de ferramentas e geometrias, variação dos parâmetros de corte, máquina-ferramenta e a metodologia de furação, que serão detalhadas a seguir.

3.2.1 Máquina-ferramenta

Os ensaios de furação foram realizados em um centro de usinagem instalado no Laboratório de Usinagem e Comando Numérico (USICON) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, fabricado pela empresa CHARLES modelo MVC 955 equipada com um comando numérico SIEMMES 840Di. No Quadro 6, encontram-se as características do centro de usinagem utilizado. Para a realização deste experimento, foi desenvolvido um suporte para fixação dos corpos de prova a serem submetidos aos ensaios de furação. Uma das exigências deste suporte é que fosse possível realizar dois ensaios de furação sem precisar substituir ou mover os corpos de prova. Optou-se em um sistema rígido para diminuir a influência de outras variáveis, mesmo sabendo que em algumas aplicações práticas na indústria, estes podem sofrer cargas como flexão e compressão entre outras. Este suporte, constituído por duas estruturas quadrangulares com um reforço do meio, foi construído com cantoneiras de perfil “L” de aço carbono, como pode ser visto na Fig. 14A.

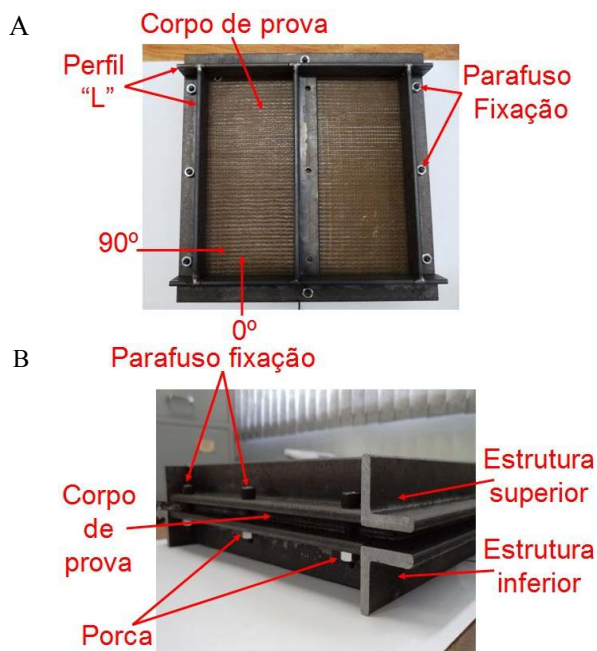
Os corpos de prova para os ensaios de furação ficaram entre as duas estruturas que foram unidas através de parafusos passantes e porcas. Os parafusos foram soldados em uma das estruturas para facilitar a troca dos corpos de prova durante os ensaios de furação.

Quadro 6: Características do Centro de usinagem.

Característica	Valor	Unidade
Eixo Árvore - Cabeçote		
Potência do motor Principal	7,5	kW
Rotação do Eixo Árvore	8000	rpm
Sistema de Fixação da Ferramenta	Pneumático	
Curso		
Eixo X – Longitudinal	900	mm
Eixo Y – Transversal	550	mm
Eixo Z – Vertical	530	mm
Velocidade de avanço		
Eixo X e Y	20	m/mim
Eixo Z	15	m/mim

Fonte: Autor.

Figura 14: Suporte de fixação.



Fonte: Autor.

3.2.2 Brocas utilizadas

No presente estudo utilizou-se cinco brocas helicoidais com geometrias diferentes para realização dos ensaios de furação com o objetivo de determinar quais as geometrias proporcionariam menores áreas danificadas ao redor dos furos, sendo que estes danos foram quantificados pelo cálculo do fator de delaminação.

Três das cinco brocas utilizadas eram fabricadas com aço rápido (HSS) com geometria convencional variando o ângulo de ponta e também o tipo de revestimento. As outras duas brocas eram de metal duro (MD), uma com geometria convencional e a outra com geometria especial para furação de materiais compósitos. Mais detalhes destas brocas encontram-se no Quadro 7.

Quadro 7: Informações sobre as brocas deste experimento.



Broca helicoidal de HSS, classe M2, sem revestimento, afiação em cruz, Ø 6 mm e fabricado pela DORMER.

118°



Broca helicoidal de HSS, classe M2, com revestimento em TiN, afiação em cruz, Ø 6 mm e fabricado pela empresa DORMER.

130°



Broca helicoidal de HSS, classe M42 com revestimento em Cobre, afiação em cruz, Ø 6 mm e fabricado pela empresa DORMER.

135°



Broca helicoidal de MD, com revestimento em WDi, afiação em R, Ø 6 mm e fabricado pela empresa OSG.

140°



Broca de MD, classe H10F, sem revestimento, Ø 6,35 mm e fabricado pela empresa SANDVIK.

90°



Fonte: De acordo com os fabricantes e adaptado pelo Autor.

3.2.4 Metodologia de furação

Com base nas informações extraídas dos trabalhos anteriores, foi possível determinar a variação dos parâmetros de corte e a metodologia de furação que foi aplicada neste experimento. Todavia, para definição de quais parâmetros utilizar, foram realizados pequenos testes de furação extrapolando-se os valores máximo e mínimos. Através de uma inspeção visual da região danificada, definiu-se que a velocidade de corte a ser adotada nos ensaios de furação seria de 10 a 57m/mim e o avanço na faixa de 0,08 a 0,30mm. As variáveis do projeto a) opções de corpos de prova, b) tipos de brocas, e c) parâmetros de corte, podem ser observados no Quadro 8.

Quadro 8: Variáveis do experimento.

Variáveis do Experimento					
Brocas	118°	130°	135°	140°	E-90°
f (mm)	0,08	0,15	0,30		
v_c (m/mim)	10	28	57		
Corpos de prova	[0°/90°]	[-45°/45°]			

Fonte: Autor.

Para organizar todas as variáveis e conduzir a ordem dos ensaios, foi utilizado o *software* “MiniTab 17” (MiniTab, 2014), com a ferramenta *Fatorial Design* com *Level* 5; 3; 3. O apêndice A mostra a seqüência de ensaios proposto pelo *software* para uma opção de corpos de prova, repetindo-se a mesma seqüência para a outra opção. Para evitar que o desgaste da broca influenciasse na qualidade dos furos, cada broca realizou 120 furos, ou seja, três ensaios de furação. Determinou-se que as brocas novas seriam usadas nos ensaios com os parâmetros mínimo, médio e máximo desse experimento e para os demais se respeitou a seguinte ordem conforme o Quadro 9.

Quadro 9: Condições da broca conforme número de furos.

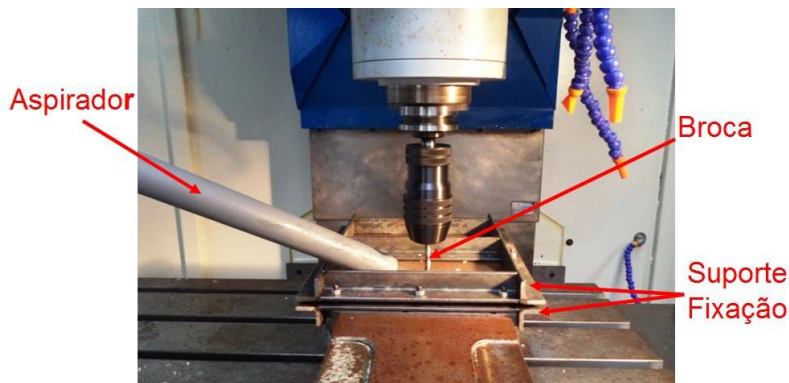
Nº de Brocas	Nº de Furos		
	1 - 40 (nova)	41 - 80	81 - 120
Broca 1	$f=0,08 - v_c=10$	$f=0,08 - v_c=28$	$f=0,08 - v_c=57$
Broca 2	$f=0,15 - v_c=28$	$f=0,15 - v_c=57$	$f=0,15 - v_c=10$
Broca 3	$f=0,30 - v_c=57$	$f=0,30 - v_c=10$	$f=0,30 - v_c=28$

Fonte: Autor.

Legenda: f (mm) – v_c (mm/mim)

Os ensaios de furação foram realizados sem refrigeração e sem lubrificação. Devido ao tipo de cavaco gerado pela furação em materiais compósitos a seco serem normalmente um pó, foi necessário utilizar um aspirador para auxiliar a remoção de cavaco e evitar que eles se espalhassem na máquina-ferramenta, conforme a Fig. 15.

Figura 15: Ensaio de furação.



Fonte: Autor.

Estando definidas todas as variáveis envolvidas neste experimento, a metodologia empregada para o processo de furação e a sequência dos ensaios, foi necessário definir os equipamentos a serem utilizados para obter as imagens digitais dos furos e suas propriedades mecânicas, para que, posteriormente, fosse possível empregar os métodos propostos para quantificar os resultados.

3.3 MEIOS DE MEDIÇÃO

Analisando-se as amostras dos experimentos foi possível elaborar conclusões qualitativas e quantitativas. Para as rebarbas encontradas na saída dos furos, devido à falta de total ruptura das fibras e o desgaste das brocas, foram realizadas análises qualitativas por meio de inspeção visual das imagens obtidas por um estereoscópio. Todavia, para realização destas análises foi necessário que se seguissem procedimentos para aquisição de imagem e cálculo do fator de delaminação, que são descritos a seguir.

Para caracterizar os corpos de prova foram realizados ensaios mecânicos de tração segundo a norma ASTM D3039 e ensaio de impacto conforme a norma ASTM D256. As amostras também foram pesadas para calcular o percentual de fibra do laminado. Para todas as medições realizadas neste experimento foram realizadas sete medições por amostra, sendo que se optou por eliminar o maior e menor valor encontrado, submetendo-se as cinco medições restantes ao cálculo de média e desvio padrão.

3.3.1 Fração volumétrica de fibra

Para calcular a fração volumétrica de fibra do laminado foi utilizada a equação (10), onde (Fv) é a fração volumétrica de fibra do laminado em porcentagem, (Acp) é a área dos corpos de prova em m², (Gcp) é o peso total (expresso em gramas) de reforços de fibra de vidro propostos no plano de laminação e (Pbal) é o peso total dos corpos de prova em gramas. Para pesar os corpos de prova foi utilizada uma balança eletrônica de precisão com capacidade de 5 kg e divisão de 0,1 gramas.

$$Tf = \frac{(Acp \times Gcp \times 100)}{Pbal} \% \quad (10)$$

3.3.2 Propriedades mecânicas

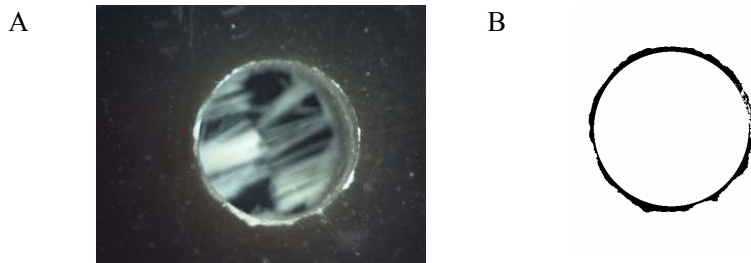
Os ensaios de tração foram feitos de acordo com a norma ASTM D3039. Foram produzidos corpos de prova retangulares com dimensões de 250 mm de comprimento por 25mm de largura e 6mm de espessura. Foi utilizada uma Máquina Universal de Ensaio da marca Emic, modelo MUE-100 célula de carga de 100 kN. A velocidade de ensaio foi de 3mm/min para todos os ensaios.

Os ensaios de impacto foram realizados segundo a norma ASTM D256. Foram produzidos corpos de prova retangulares de 63,5mm de comprimento por 12,7mm de largura e 6mm de espessura com entalhe de 2,5mm de acordo com o método IZOD. Os ensaios de resistência a impacto foram realizados em um equipamento da marca EMIC modelo AIC 1.

3.3.3 Aquisição das imagens e análises dos furos

No âmbito desta pesquisa foram realizados noventa ensaios de furação, cada um deles contendo 40 furos. Em cada ensaio de furação foram escolhidos aleatoriamente sete furos. As digitalizações dos furos foram realizadas através de um microscópio estereoscópico marca OPTON modelo TNE – 02B com aumento de 7x a 30x que proporcionou imagens como a da Fig. 16. Após a digitalização de todos os furos foi utilizado o *software* de domínio público da *National Institute of Health* dos Estados Unidos chamado *ImageJ* (ImageJ, 2014) para tratar as imagens com regulagem de tons, contraste e brilho além da utilização de um filtro binário para melhor determinar a área danificada, como mostra a Fig. 16B.

Figura 16: (A) Imagem do furo. (B) Imagem do furo após filtro binário.



Fonte: Autor.

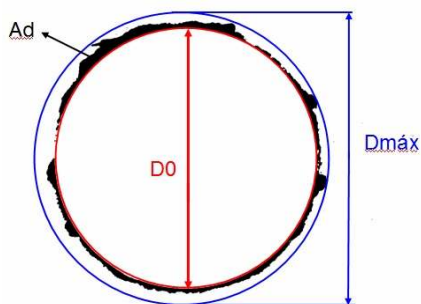
3.3.4 Fator de Delaminação

Com o objetivo de comparação e melhor representação do dano dos furos foram aplicados quatro métodos de cálculo de fator de delaminação conforme visto no capítulo anterior.

Para quantificar os danos dos furos deste estudo adotou-se o método do fator de delaminação ajustado (Fda) proposto por DAVIM *et al.* (2007), pois esse leva em consideração a área danificada (Ad), assim podendo melhor representar o dano real do furo. Através do *software ImageJ*, também foi possível calcular a área delaminada (Ad) e obter o diâmetro máximo danificado (Dmáx). Como o diâmetro da broca (D0) era conhecido, já havia condições para aplicar este método que é calculado através das equações (3), (4) e (5) conforme apresentados anteriormente. (RUBIO¹ *et al.* (2007); ALVAREZ *et al* (2013); DAVIM

et al. (2007) e KRISHNARAJ *et al.* (2012)). Na Fig. 17 encontram-se as variáveis necessárias para o cálculo do Fda.

Figura 17: Representação dos dados para cálculo do Fda.



Fonte: Autor.

Devido a constante presença de rebarbas na saída dos furos por falta de rompimento das fibras, onde isto ocorre frequentemente na indústria náutica, estas rebarbas necessitam de um pós-processo para sua remoção. Para determinar quais furos possuem menor quantidade de rebarba na saída dos furos, foram utilizadas as imagens dos furos digitalizados para realizar uma análise qualitativa e comparativa entre os furos que possuírem os mesmos Fda. A Fig. 18 mostra dois furos com diferentes formas de rebarbas na saída.

Figura 18: Rebarbas por falta de rompimento da fibra.



Pouca rebarba, facilmente corrigida por lixamento manual.



Muita rebarba, correção com equipamento e escareador.

Fonte: Autor.

3.3.4 Análise estatística

Nesta pesquisa foram utilizados dois métodos estatísticos: a) a Análise de Variância (ANOVA) para saber quais as variáveis ou interações entre elas tem maior influência sobre os resultados, e b) o teste de *Tukey* para comparar as igualdades entre os resultados.

Segundo Tirola (2014) e Morettin (2013) a ANOVA é um método para teste de igualdade de três ou mais médias populacionais através da análise das variâncias amostrais que é usada com dados categorizados por um tratamento ou fator que é uma característica que permite distinguir as populações umas das outras. O Teste de *Tukey* é um teste de comparação entre médias que serve para complementar a análise de variância. Neste estudo, teve como principal função determinar quais as variações dos parâmetros de processo que possuem o mesmo Fda com nível de confiança de 95%.

Com a determinação de todas as variáveis do processo, metodologia de furação, meios de medição e métodos de análises estatísticas pôde-se dar início a análise dos resultados e as discussões relacionadas, tema do capítulo a seguir.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão analisados os resultados obtidos em todos os ensaios realizados nesta pesquisa. Inicialmente, cada broca será avaliada individualmente, além de discutir as características dos corpos de prova, tais como fração volumétrica de fibra e propriedades mecânicas do material. Em uma próxima etapa deste capítulo serão comparados quatro métodos para quantificar a área danificada nos furos, assim sendo possível escolher o método que melhor caracterizasse os danos. Subsequentemente serão analisados os resultados referentes aos ensaios de furação evidenciando os melhores e piores resultados e a influência dos parâmetros de corte e geometria da ferramenta sobre a região danificada.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA


Com a finalidade de determinar as características dos materiais, foi realizada a pesagem dos corpos de prova para se obter a fração volumétrica de fibra de vidro do laminado. Também foram realizados ensaios de resistência à tração e de impacto com intuito de determinar algumas propriedades mecânicas destes materiais, visando comparar os resultados deste estudo com os de outros autores.


4.1.1 Fração volumétrica de fibra de vidro dos corpos de prova

Devido aos corpos de prova serem quadrados e planos é relativamente simples calcular o percentual de fibra de vidro, conforme mencionado no capítulo 3, sendo que a equação (10) será utilizada com este intuito. Desta maneira, “Acp” é o tamanho da placa em metros (0,232m x 0,232m), o “Gcp” é a somatória da gramatura das mantas e dos tecidos de fibras de vidro para cada um dos planos de laminação. Assim, para o plano de laminação $[0^\circ/90^\circ]$, o “Gcp” é de 3975g/m² e para o $[-45^\circ/45^\circ]$, o “Gcp” é de 4274g/m². “Pbal” é o valor fornecido pela balança, sendo que estas informações e os resultados para fração volumétrica de fibra (Fv) estão expressos no Quadro 10.

Com esse procedimento foi possível verificar que as duas opções dos corpos de prova têm a mesma concentração da fração volumétrica de fibra no laminado. É válido ressaltar que estes possuem diferentes massas, pois a quantidade de camadas e gramaturas destes materiais variaram, no entanto foi possível manter a mesma proporção de fibra e resina no laminado.

Quadro 10: Resultados do cálculo de fração volumétrica de fibra.

Nº de ensaios	Pbal (g)	Acp (m ²)	Gcp (g)	Fv (%)	
1	535,1	0,054	3975	40,1	 [0°/90°]
2	537,2	0,054	3975	40,0	
3	536,5	0,054	3975	40,0	
4	535,6	0,054	3975	40,1	
5	537,8	0,054	3975	39,9	
Média	536,4	0,054	3975	40,0	
DP	1,11	0,00	0,00	0,08	

Nº de ensaios	Pbal (g)	Acp (m ²)	Gcp (g)	Fv (%)	
1	576,5	0,054	4274	40,0	 [-45°/45°]
2	575,2	0,054	4274	40,1	
3	575,4	0,054	4274	40,1	
4	577,1	0,054	4274	40,0	
5	577,7	0,054	4274	40,0	
Média	576,4	0,054	4274	40,0	
DP	1,08	0,00	0,00	0,05	



Fonte: Autor.

4.1.2 Resistência à tração

A resistência à tração em materiais compósitos depende das características das fibras tais como: gramatura do material, quantidade de camadas e orientações das fibras de vidro. O Quadro 11 mostra os resultados obtidos para força máxima e tensão máxima para as duas opções de plano de laminação deste estudo. A Fig. 19 mostra o comportamento da força máxima em relação ao tempo para os materiais [0°/90°] e [-45°/45°].

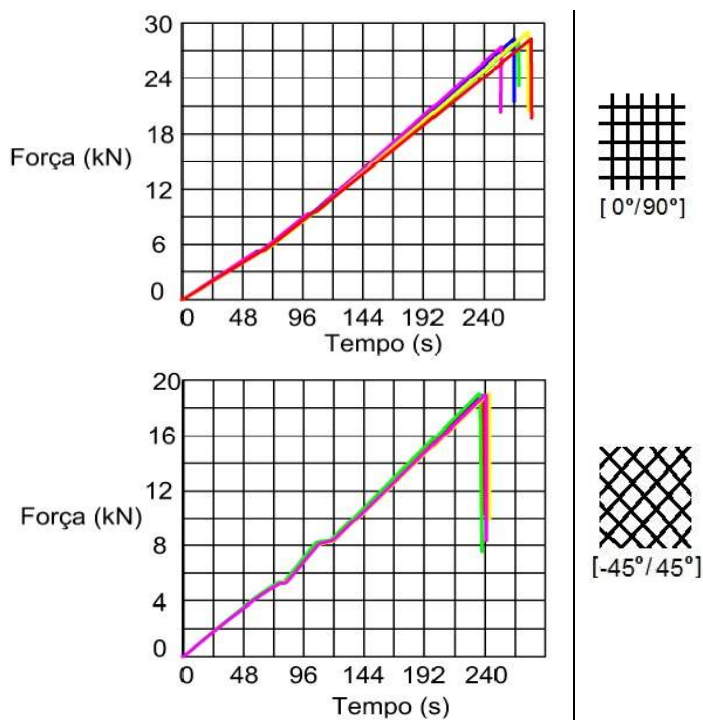
O material [0°/90°] mesmo com uma camada de fibra de vidro a menos, possui resistência à tração 40% maior que [-45°/45°]. Esta diferença está relacionada à orientação das fibras dispostas sobre os corpos de prova. O material [0°/90°] possui fibras longas no sentido em que irá receber as cargas. No entanto, no material [-45°/45°] as fibras estão em diagonal do sentido que irá receber as cargas, conforme pode-se observar na Fig. 20. A diferença na resistência à tração entre as amostras do mesmo material [0°/90°] varia em torno de 8%, todavia o material [-45°/45°] não obteve uma variação significativa.

Quadro 11: Resultados dos ensaios de resistência à tração.

Nº de ensaios	Força máx (kN)	Tensão máx (MPa)		Força máx (kN)	Tensão máx (MPa)	
1	27	182	 [0°/90°]	19	129	 [-45°/45°]
2	26	175		19	129	
3	28	190		19	129	
4	27	177		19	129	
5	27	180		19	129	
Média	27	181		19	129	
DP	0,7	6		0	0	

Fonte: Autor.

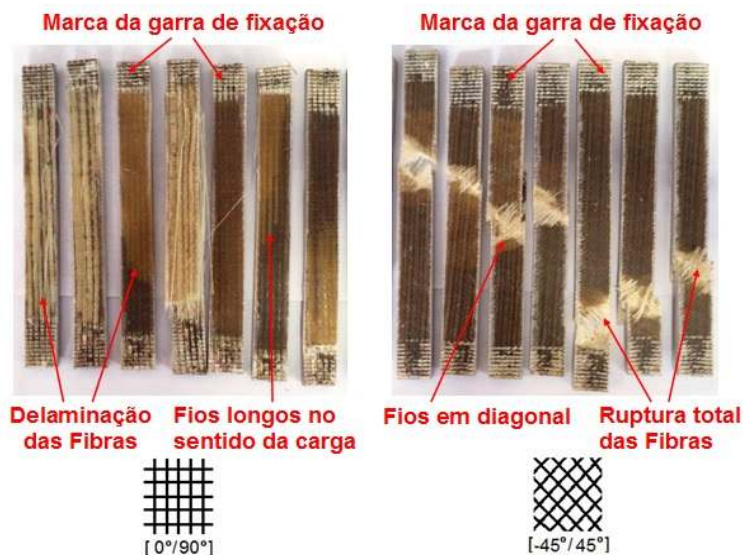
Figura 19: Comportamento da força em relação ao tempo nos corpos de prova.



Fonte: Autor.

A Fig. 20 mostra os corpos de prova rompidos após a realização dos ensaios de tração, e as marcas das garras de fixação do equipamento de ensaio nos corpos de prova.

Figura 20: Corpos de prova rompidos pelo ensaio de tração



Fonte: Autor.

No material $[0^\circ/90^\circ]$, os corpos de prova não sofreram ruptura total, pois delaminaram na interface de união entre as camadas do tecido com as mantas. Todavia, o material $[-45^\circ/45^\circ]$ teve uma ruptura total dos corpos de prova onde consegue-se notar os sentidos das fibras. Ao projetar uma peça que será fabricada com materiais compósitos reforçados com fibras é necessário saber as direções nas quais a peça irá receber as cargas, assim podendo-se direcionar as fibras aproveitando o máximo das suas propriedades mecânicas.

No estudo realizado por Khashaba¹ *et al.* (2010), os corpos de prova possuem 25 camadas de fibra, totalizando uma espessura de 8,3mm, com fração volumétrica de fibra de vidro de 35% em uma matriz epóxi, o que resultou em uma resistência à tração de 204MPa. Nos ensaios realizados por Kilickap *et al.* (2010) e Lazar (2011), ambos construíram corpos de prova de fibras de vidro com matriz epóxi, com espessura de 10mm, no entanto, não especificaram números de camadas,



sendo que Lazar (2011) informou que a fração volumétrica de fibra do seu laminado variou de 60 a 70%. Ambos os autores obtiveram uma resistência à tração de 240 MPa. Nesses três estudos a diferença na resistência à tração é proporcional à diferença de espessura, assim considerando que ambos possuem a mesma resistência.

Comparando os resultados desses três estudos citados anteriormente com os resultados dessa pesquisa, todavia considerando que os tivessem a mesma espessura, os corpos de prova desta pesquisa teria uma resistência 22% maior para $[0^\circ/90^\circ]$ e 15% menor para $[-45^\circ/45^\circ]$ com uma espessura de $6,2 \pm 2\text{mm}$. A gramatura do material, orientação e espessura dos fios de fibra têm grande influência na resistência mecânica dos materiais, assim justificando as diferenças encontradas.

4.1.3 Resistência ao impacto

Para saber a resistência ao impacto foi usado o método Izod, em que as duas opções de corpos de prova alcançaram diferentes resistências, conforme o Quadro 12.

Quadro 12: Resultados dos ensaios de resistência ao impacto

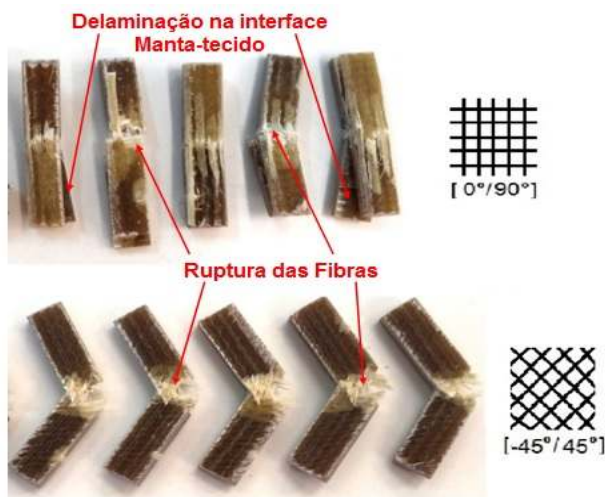
Nº de ensaios	t (mm)	Es (J)	β (°)	Is (J/m)	t (mm)	Es (J)	β (°)	Is (J/m²)
1	6,1	2,10	133,2	337	6,3	1,38	138,3	208
2	6,1	2,08	133,3	333	6,3	1,32	138,7	202
3	6,2	2,12	133,0	334	6,4	1,34	138,6	202
4	6,2	2,10	133,2	331	6,4	1,38	138,3	208
5	6,1	2,06	133,4	330	6,3	1,30	138,9	202
Média	6,1	2,09	133,2	333	6,3	1,34	138,6	205
DP	0,05	0,02	0,15	2,6	0,07	0,04	0,27	3,4
 $[0^\circ/90^\circ]$					 $[-45^\circ/45^\circ]$			
E: Espessura do material					B: ângulo atingido pelo pêndulo na quebra			
Es: Valor da energia após impacto					Is: resistência ao impacto do material			

Fonte: Autor.

O material $[0^\circ/90^\circ]$ proporcionou uma resistência ao impacto aproximadamente 60% maior que o material $[-45^\circ/45^\circ]$, sendo que este

possui uma maior espessura, cerca de 3%, assim servindo como justificativa desta diferença. Os corpos de prova $[0^\circ/90^\circ]$ apresentaram ruptura total, além de delaminarem na interface manta-tecido. Entretanto, o material $[-45^\circ/+45^\circ]$ sofreu somente ruptura total, não ocorrendo a delaminação na interface manta-tecido. A Fig. 21 mostram os corpos de prova após os ensaios de impacto.

Figura 21: Corpos de prova rompidos pelo ensaio de impacto.



Fonte: Autor.

Com as análises dos resultados referentes à resistência a tração e ao impacto dos materiais é possível afirmar que o material $[0^\circ/90^\circ]$ possui melhor resistência mecânica dentre os ensaios realizados neste estudo. Mesmo os materiais possuindo o mesmo fração volumétrica de fibra, tipo de vidro e matriz polimérica, notou-se que as diferentes características das fibras como gramatura do material e orientação das fibras são os fatores que possuem maior influência na resistência mecânica. Por conta deste estudo, observou-se que o material $[-45^\circ/45^\circ]$, além de possuir uma camada a mais de tecido, maior massa e maior espessura, apresentou resistência mecânica inferior, na faixa 35%.

Com base nestes resultados e com a realização de outros testes de resistência mecânica, tais como flexão e fadiga, conclui-se ser possível fabricar embarcações com menor massa e espessura final do laminado, mantendo-se as propriedades mecânicas, simplesmente tomando-se o

cuidado de orientar as fibras na direção das cargas em que a força será exercida, além da escolha correta da gramatura do material a ser utilizado no laminado. Após as caracterizações dos corpos de prova, foram avaliadas as qualidades dos furos visando estabelecer uma relação com as características dos materiais utilizados.

4.2 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS FUROS

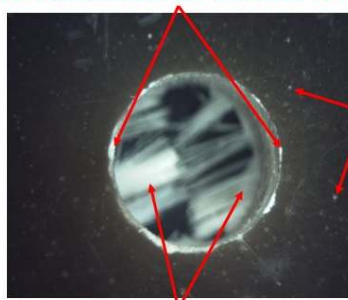
Após a realização dos ensaios de furação e a aquisição das imagens dos furos, foi necessário entender o que aconteceu na periferia da região usinada. Os corpos de prova possuíam um lado liso devido ao seu contato com o molde, sendo que o início da furação sempre ocorreu a partir desta face. No outro lado, a superfície era irregular devido às espessuras e orientações dos fios de fibras do laminado. A observação dos danos causados pela saída das brocas foi realizada sempre nestas faces. A Fig. 22A apresenta os danos típicos que ocorreram na entrada dos furos, onde se observa uma área danificada e/ou delaminada ao redor do furo, decorrente da ação da broca ao longo do processo de penetração no material. Também é possível observar, pequenos defeitos de laminação, como as microbolhas além do que no final do furo (região de saída da broca), é possível observar as fibras de vidro que não foram totalmente rompidas pela broca. A Fig. 22B mostra o mesmo furo que a Fig. 22A, entretanto submetido à utilização do *software ImageJ*, que por meio da aplicação do filtro binário permitiu coletar informações sobre a área danificada e o diâmetro máximo delaminado.

A Fig. 23A evidencia os danos típicos que ocorrem na região ao redor da saída do furo. A superfície irregular é formada pelos fios de fibras que compõem os tecidos e a orientação do material. Os fios de costura unem as camadas do tecido, dificultando a sua ruptura e fazendo com que eles não se separem antes da aplicação da resina. A Fig. 23B apresenta a mesma imagem do furo da Fig 23A, entretanto, após a utilização do filtro binário que evidencia a região danificada.

Na indústria naval, normalmente, os fios da fibra de vidro que não sofreram ruptura total após a furação necessitam de um pós-processo, sendo que os furos são escareados pelo lado da saída da broca ou lixados manualmente para eliminar essas rebarbas, antes das peças laminadas serem montadas ou fixadas. Uma vez compreendido como ocorrem os danos encontrados na entrada e na saída dos furos, o tópico a seguir apresenta quatro métodos para quantificar a extensão destas falhas.

Figura 22: Imagens dos danos na entrada do furo.

Área danificada na entrada do furo



Microbolhas

Fibras sem ruptura total

A: Imagem da entrada do furo.

Área danificada

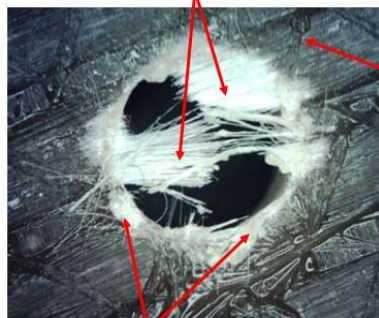


B: Imagem após filtro.

Fonte: Autor.

Figura 23: Imagem dos danos na saída do furo.

Fibras sem ruptura total



Fio da costura

Área danificada na saída do furo

A: Imagem da saída do furo.

Área danificada



B: Imagem após filtro.

Fonte: Autor.

4.2.1 Resultados dos métodos para quantificar a delaminação

Atualmente, existem vários métodos para quantificar a extensão da região danificada ao redor dos furos, sendo que estes métodos foram apresentados mais detalhadamente no capítulo 2. No presente estudo, foi realizado um comparativo entre estes quatro métodos, sendo que o

intuito era escolher o que melhor quantificasse a região danificada. O método (Ds) consiste na diferença entre o raio máximo delaminado e o raio da broca. Entretanto, esta metodologia não é um fator resultante de um razão, o que o torna difícil de comparar com os demais resultados. O fator de delaminação (Fd) é amplamente utilizado, no entanto, não considera a área danificada. Portanto, não quantificando corretamente a região danificada. O fator de laminação proposto (Fdp) é um método que considera a área danificada, através das quantidades dos diâmetros de picos e vales, com o objetivo de melhor quantificar a região danificada, porém, possui uma metodologia mais complexa. O fator de delaminação ajustado (Fda) é um método que pode ser facilmente aplicado, pois, possui uma metodologia simples para quantificar a região delaminada, além de considerar a área danificada.

O Quadro 13 mostra os resultados e os desvios padrão (DP) para o ensaio de furação no material $[0^\circ/90^\circ]$, com a broca E-90°, velocidade de corte de 28m/mim e avanço de 0,15mm. Estas condições foram escolhidas através de uma análise qualitativa da área danificada na entrada e saída dos furos, pois, apresentaram os melhores resultados para uma análise comparativa entre os métodos que visavam quantificar a região danificada ao redor dos furos.

Quadro 13: Comparativo entre fatores de delaminação $[0^\circ/90^\circ]$ para broca E-90°, com $v_c=28\text{m/mim}$ e $f=0,15\text{mm}$.

Nº de ensaios	Entrada $[0^\circ/90^\circ]$				Saída $[0^\circ/90^\circ]$			
	Ds	Fd	Fda	Fdp	Ds	Fd	Fda	Fdp
1	0,31	1,10	1,14	1,12	1,21	1,38	1,62	1,60
2	0,18	1,06	1,09	1,08	1,14	1,36	1,62	1,59
3	0,37	1,12	1,16	1,15	1,23	1,39	1,60	1,57
4	0,33	1,10	1,15	1,13	1,23	1,39	1,62	1,61
5	0,26	1,08	1,11	1,09	1,19	1,37	1,62	1,58
Média	0,29	1,09	1,13	1,12	1,20	1,38	1,62	1,59
DP	0,07	0,02	0,03	0,03	0,04	0,01	0,01	0,01

Variáveis do ensaio: Broca E-90°, $v_c=28\text{m/mim}$ e $f=0,15\text{mm}$.

Fonte: Autor.

O Quadro 14 mostra os resultados e os desvios padrão para os ensaios de furação no material $[-45^\circ/45^\circ]$, com a broca 135° usando velocidade de corte de 10m/mim e avanço de 0,30mm.

Para uma melhor análise dos resultados, foi utilizado o teste de *Tukey* com o objetivo de determinar quais seriam os melhores métodos para quantificar a região danificada. Com base nos dados obtidos e apresentados nos quadros 13 e 14, os métodos Fda e Fdp foram os que melhor quantificaram a região danificada através de uma análise estatística, com nível de confiança de 95%. Todavia, o método Fda mostrou ser uma metodologia mais fácil e mais rápida, pois necessita quatro vezes menos tempo para caracterização do que o método Fdp. Considerando-se que os métodos Fda e Fdp alcançam os mesmos resultados, e que neste estudo foram analisadas mais de 1.250 imagens, optou-se pela escolha do método Fda.

Quadro 14: Comparativo entre fatores de delaminação $[-45^\circ/45^\circ]$ para broca 135° , com $v_c = 10\text{m/mim}$ e $f = 0,30\text{mm}$.

Nº de ensaios	Entrada $[-45^\circ/45^\circ]$				Saída $[-45^\circ/45^\circ]$			
	Ds	Fd	Fda	Fdp	Ds	Fd	Fda	Fdp
1	0,83	1,28	1,50	1,48	2,55	1,85	2,25	2,22
2	0,79	1,26	1,49	1,47	2,56	1,85	2,25	2,22
3	0,90	1,30	1,54	1,51	2,32	1,77	2,18	2,15
4	1,18	1,39	1,61	1,59	2,13	1,71	2,11	2,08
5	1,09	1,36	1,59	1,57	2,06	1,69	2,09	2,06
Média	0,96	1,32	1,55	1,52	2,32	1,77	2,18	2,14
DP	0,08	0,06	0,05	0,05	0,23	0,08	0,08	0,08

Variáveis do ensaio: Broca 135° ; $v_c = 10\text{m/mim}$ e $f = 0,30\text{mm}$.

Fonte: Autor.

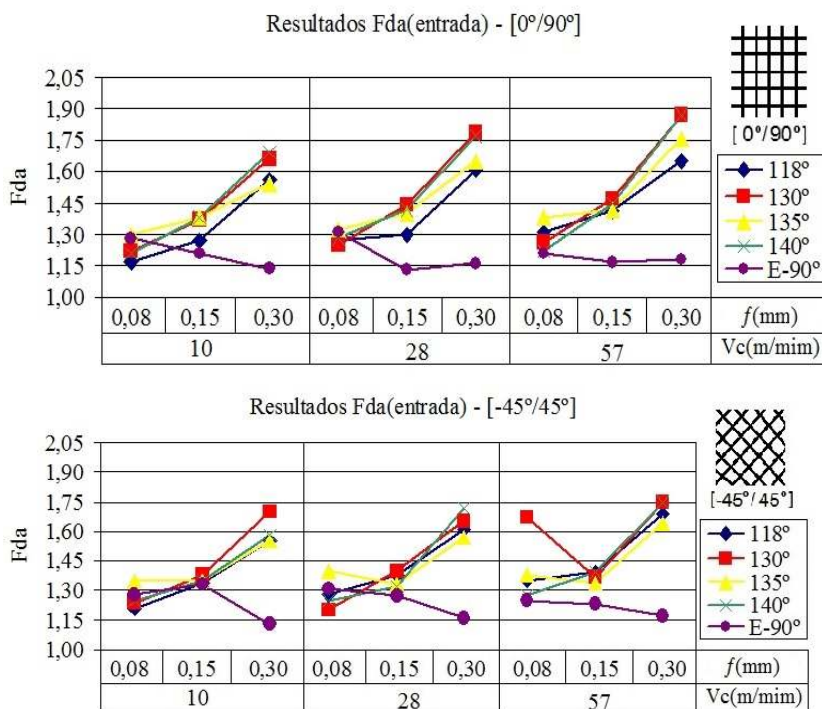
Uma vez que se optou pela utilização do método Fda para quantificar as áreas danificadas dos furos, os próximos tópicos deste estudo apresentam os danos causados na entrada e na saída dos furos, e a influências que os parâmetros de corte e as geometrias das ferramentas causaram na região danificada dos furos.

4.2.2 Danos na entrada dos furos

O fator de delaminação ajustado (Fda) proposto por Davim *et al* (2007) determina os seguintes parâmetros de avaliação: a) área da região delaminada ou danificada (A_d), b) o diâmetro máximo danificado ($D_{\text{máx}}$) e c) o diâmetro das brocas (D_0). Com a determinação desses valores e com as equações (3), (4) e (5), foi possível calcular Fda (entrada) e Fda

(saída) para todos os ensaios desse estudo. O Quadro 15 mostra os resultados médios de Fda(entrada) e seus desvios padrão para os ensaios de furação, abrangendo todos os parâmetros de corte, geometria das ferramentas e os corpos de prova $[0^\circ/90^\circ]$ e $[-45^\circ/45^\circ]$. A Figura 24 permite melhorar a compreensão dos resultados e entender as tendências para Fda (entrada) conforme as variações dos parâmetros.

Figura 24: Resultados médios para Fda(entrada) – $[0^\circ/90^\circ]$ e $[-45^\circ/45^\circ]$.



Fonte: Autor.

Através da análise ANOVA, que pode ser observada no Quadro 16, foi possível verificar quais parâmetros tiveram influência sobre os resultados em Fda (entrada), sendo que, se o valor-P fosse menor que 0,05, o parâmetro apresentaria influência significativa nos resultados. Neste caso, a diferença entre os materiais e as repetições não apresentaram influência significativa no resultados.

Quadro 15: Resultados médios para Fda(entrada) – [0°/90°] e [-45°/45°].

<i>f</i> (mm)	<i>v_c</i> (m/mim)	118°		130°		135°		140°		E-90°	
		Fda	DP	Fda	DP	Fda	DP	Fda	DP	Fda	DP
0,08	10	1,17	0,03	1,22	0,03	1,30	0,06	1,21	0,00	1,28	0,01
0,08	28	1,27	0,03	1,25	0,04	1,32	0,02	1,28	0,04	1,31	0,02
0,08	57	1,31	0,02	1,24	0,03	1,38	0,01	1,22	0,02	1,21	0,01
0,15	10	1,27	0,01	1,37	0,01	1,38	0,04	1,38	0,05	1,21	0,02
0,15	28	1,30	0,02	1,44	0,04	1,40	0,06	1,42	0,02	1,13	0,03
0,15	57	1,41	0,02	1,47	0,02	1,42	0,02	1,45	0,01	1,17	0,01
0,30	10	1,56	0,04	1,66	0,02	1,54	0,06	1,69	0,06	1,14	0,02
0,30	28	1,61	0,06	1,79	0,02	1,65	0,13	1,77	0,08	1,16	0,01
0,30	57	1,65	0,12	1,87	0,03	1,76	0,09	1,87	0,06	1,18	0,02
0,08	10	1,21	0,02	1,24	0,04	1,35	0,04	1,25	0,03	1,28	0,04
0,08	28	1,28	0,02	1,20	0,01	1,40	0,02	1,25	0,03	1,31	0,01
0,08	57	1,35	0,02	1,67	0,04	1,38	0,02	1,27	0,03	1,25	0,02
0,15	10	1,34	0,07	1,38	0,02	1,35	0,02	1,35	0,03	1,33	0,03
0,15	28	1,38	0,01	1,40	0,06	1,33	0,02	1,32	0,05	1,27	0,02
0,15	57	1,39	0,03	1,37	0,05	1,34	0,03	1,39	0,04	1,23	0,01
0,30	10	1,55	0,05	1,70	0,06	1,55	0,06	1,58	0,05	1,13	0,02
0,30	28	1,61	0,06	1,65	0,02	1,57	0,05	1,72	0,06	1,16	0,01
0,30	57	1,69	0,05	1,75	0,03	1,64	0,01	1,75	0,04	1,17	0,02



Fonte: Autor.

O teste de *Tukey* foi realizado para mostrar estatisticamente quais médias apresentaram os mesmos valores para ambos os materiais, com nível de confiança de 95%. Também serviu para atribuir informações para determinar as influências que as variáveis tiveram sobre os valores de Fda (entrada). Os resultados deste teste encontram-se no apêndice B, onde as médias em que as letras coincidissem entre si são estatisticamente iguais.

Quadro 16: Análise de Variância Fda(entrada) para ambos os materiais.

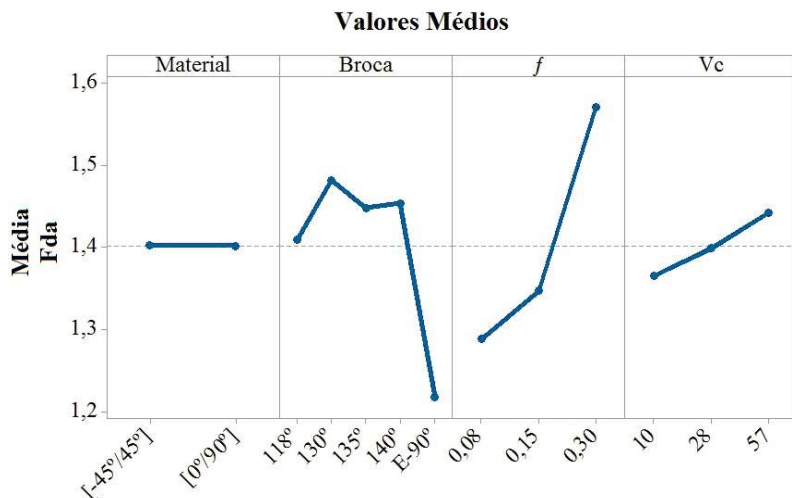
Fonte	GL*	SQ**	MQ***	Valor-F	Valor-P
Material	1	0,0001	0,0001	0,06	0,81
Repetição	4	0,0021	0,00052	0,31	0,87
Broca	4	4,0557	1,01392	597,65	0,00
f	2	6,676	3,33799	1967,57	0,00
v_c	2	0,4403	0,22013	129,76	0,00
Material x Broca	4	0,1203	0,03007	17,73	0,00
Material x f	2	0,1664	0,0832	49,04	0,00
Material x v_c	2	0,0164	0,00819	4,83	0,01
Broca x f	8	3,6392	0,4549	268,14	0,00
Broca x v_c	8	0,2684	0,03354	19,77	0,00
f x v_c	4	0,1192	0,02979	17,56	0,00
Material x Broca x f	8	0,1829	0,02287	13,48	0,00
Material x Broca x v_c	8	0,1005	0,01257	7,41	0,00
Material x f x v_c	4	0,1088	0,0272	16,03	0,00
Broca x f x v_c	16	0,2427	0,01517	8,94	0,00
Material x Broca x f x v_c	16	0,279	0,01744	10,28	0,00
Error	356	0,604	0,0017		
Total	449	17,0219			

* Graus de Liberdade ** Soma dos Quadrados *** Média dos Quadrados

Na furação do material $[0^\circ/90^\circ]$, as brocas 130° , 135° e 140° alcançaram seus melhores resultados com $f=0,08\text{mm}$, em todas as faixas de velocidade corte. Para a broca 118° os melhores Fda (entrada) foram com $f=0,08$ e $0,15\text{mm}$ e $v_c=10\text{m/mim}$. A broca E- 90° proporcionou seus melhores resultados com $f=0,15$ e $0,30\text{mm}$ em todas as faixas de velocidade de corte. No material $[-45^\circ/45^\circ]$, as brocas 118° e 135° obtiveram seus melhores resultados com $f=0,08\text{mm}$ e $v_c=10$ e 28m/mim . No entanto, as brocas 130° e 140° obtiveram seus melhores resultados com $f=0,08$ e $0,15\text{mm}$, em todas as faixas de velocidade de corte. A broca E- 90° obteve seus melhores resultados com $v_c=58\text{m/mim}$ e $f=0,30\text{mm}$, com todas as faixas de avanço de corte.

As brocas 118°, 130°, 135° e 140° alcançaram seus piores resultados para Fda (entrada) para ambos os materiais com os maiores parâmetros: $f=0,30\text{mm}$ e $v_c=57\text{m/mim}$. Para a broca E-90°, seus piores resultados foram obtidos com os parâmetros $f=0,08\text{mm}$ e $V_c=10$ e 28m/mim . O apêndice C e D mostram os danos na entrada dos furos causados pelo processo de furação nos materiais $[0^\circ/90^\circ]$ e $[-45^\circ/45^\circ]$ respectivamente. Na Fig. 25 mostra os principais efeitos que influenciam no Fda(entrada) para ambos os materiais.

Figura 25: Efeitos principais para Fda(entrada).



Fonte: Autor.

Legenda: $f(\text{mm}) - V_c(\text{mm/mim})$

Conforme pode-se observar na Fig. 25, não há diferenças significativas do Fda (entrada) nos materiais. Em resumo, no que se refere ao Fda (entrada) para ambos os materiais, as brocas 118°, 130°, 135° e 140°, tenderam a apresentar resultados piores conforme se aumentava o avanço e velocidade de corte, sendo que a variação do avanço proporcionou maior influência sobre os resultados. No caso da broca E-90°, observou-se que seus resultados melhoraram conforme se aumenta o avanço, sendo que a variação da velocidade de corte não teve grande influência nos resultados. A broca E-90° apresentou os melhores resultados, seguida pelas brocas 118° e 135°.

Devido ao fato de que o método Fd proposto por Davim *et al.* (2004) ser muito difundido entre os pesquisadores, para fins de comparação dos resultados deste estudo com os de outros pesquisadores, foi calculado o Fd

em algumas situações. Rubio¹ *et al.* (2007) realizaram ensaios de furação em GFRP, utilizando uma broca helicoidal de HSS com ângulo de ponta de 118°, com $f=0,15\text{mm}$ e $v_c=55\text{m/mim}$, e obtiveram um $F_d=1,19$. No presente estudo, mantendo-se estas mesmas condições de corte e geometria de broca, obteve-se um $F_d=1,23$, ou seja, 3,5% maior, ou seja, considera-se que os resultados obtidos foram os mesmos. Kilickap (2010) realizou seus ensaios de furação em GFRP, com $f=0,30\text{mm}$ e $v_c=10\text{m/mim}$, com uma broca helicoidal de HSS com ângulo de ponta de 118° e obteve um $F_d=1,42$ e com a broca helicoidal de HSS-TiN com ângulo de ponta de 135° obteve um $F_d=1,48$. Utilizando-se dos mesmos parâmetros, ao se realizar furos com uma broca de 118°, o presente estudo obteve um $F_d=1,32$ ou 7,5% menor. Já, com a broca 135° com revestimento de cobre, obteve-se um $F_d=1,44$ ou 2,8% menor, ou seja, considera-se que em ambos os casos, chegaram-se aos mesmos resultados para as mesmas condições de corte.

4.2.3 Danos na saída dos furos

Os danos na saída dos furos são maiores do que os danos na entrada. Os resultados médios de $F_{da}(\text{saída})$ e seus desvios padrão para os materiais $[0^\circ/90^\circ]$ e $[-45^\circ/45^\circ]$, abrangendo os parâmetros de corte e brocas, encontram-se no Quadro 17.

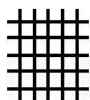
A Fig. 26, tem objetivo melhorar a compreensão dos resultados e entender as tendências para $F_{da}(\text{entrada})$, conforme as variações dos parâmetros.

Através da (ANOVA) é possível afirmar quais variáveis têm influência sobre os resultados em $F_{da}(\text{saída})$, lembrando que, quando o valor-P for menor que 0,05 os parâmetros têm influência significativa nos resultados. Estes dados encontram-se no Quadro 18 em que a repetição não tem influência significativa sobre esses resultados.

Com a finalidade de demonstrar estatisticamente quais médias apresentaram os mesmos valores para ambos os materiais, e atribuir informações para determinar as influências que as variáveis causaram nos valores de $F_{da}(\text{saída})$, foi realizado o teste de Tukey com nível de confiança de 95%. Os resultados deste teste encontram-se no Apêndice E, ressaltando que aquelas médias em que as letras são coincidentes entre si, são estatisticamente iguais. Os valores para $F_{da}(\text{saída})$, normalmente, são maiores que os valores de $F_{da}(\text{entrada})$. Neste estudo, verificou-se que os valores de saída chegaram a ser 40 a 160% maiores no material $[0^\circ/90^\circ]$, e de 40 a 120% maiores para o material $[-45^\circ/45^\circ]$.

Quadro 17: Resultados médios para Fda(saída) – [0°/90°] e [-45°/45°].

<i>f</i> (mm)	<i>v_c</i> (m/mim)	118°		130°		135°		140°		E-90°	
		Fda	DP	Fda	DP	Fda	DP	Fda	DP	Fda	DP
0,08	10	1,73	0,05	1,73	0,09	1,89	0,07	1,90	0,08	1,88	0,07
0,08	28	1,84	0,04	1,78	0,05	2,09	0,06	2,17	0,12	1,89	0,08
0,08	57	3,47	0,16	2,25	0,13	3,07	0,11	2,24	0,11	1,71	0,02
0,15	10	2,34	0,05	2,29	0,11	2,47	0,27	2,17	0,09	1,82	0,04
0,15	28	2,44	0,09	2,25	0,14	2,77	0,28	2,67	0,14	1,62	0,01
0,15	57	3,20	0,16	3,23	0,12	3,05	0,18	2,86	0,18	1,75	0,03
0,30	10	2,96	0,19	3,14	0,13	2,66	0,16	2,64	0,30	2,14	0,56
0,30	28	3,61	0,13	2,94	0,06	3,14	0,16	2,86	0,17	2,06	0,08
0,30	57	3,59	0,04	2,79	0,15	2,76	0,20	3,00	0,06	1,76	0,04
0,08	10	2,04	0,11	1,92	0,07	2,06	0,06	2,28	0,06	1,92	0,04
0,08	28	2,19	0,06	2,06	0,06	2,65	0,06	2,50	0,12	1,81	0,04
0,08	57	2,83	0,02	2,31	0,04	3,11	0,04	2,69	0,11	1,78	0,09
0,15	10	2,59	0,11	2,09	0,03	2,41	0,07	2,53	0,03	1,88	0,09
0,15	28	2,33	0,20	2,27	0,10	2,49	0,15	2,76	0,04	1,82	0,12
0,15	57	2,71	0,12	2,45	0,16	2,79	0,11	2,82	0,12	1,75	0,08
0,30	10	2,34	0,13	2,35	0,07	2,18	0,24	3,03	0,08	2,01	0,19
0,30	28	2,84	0,18	2,68	0,08	2,76	0,15	2,99	0,11	1,88	0,11
0,30	57	2,78	0,10	2,54	0,19	2,61	0,08	3,18	0,15	2,04	0,17



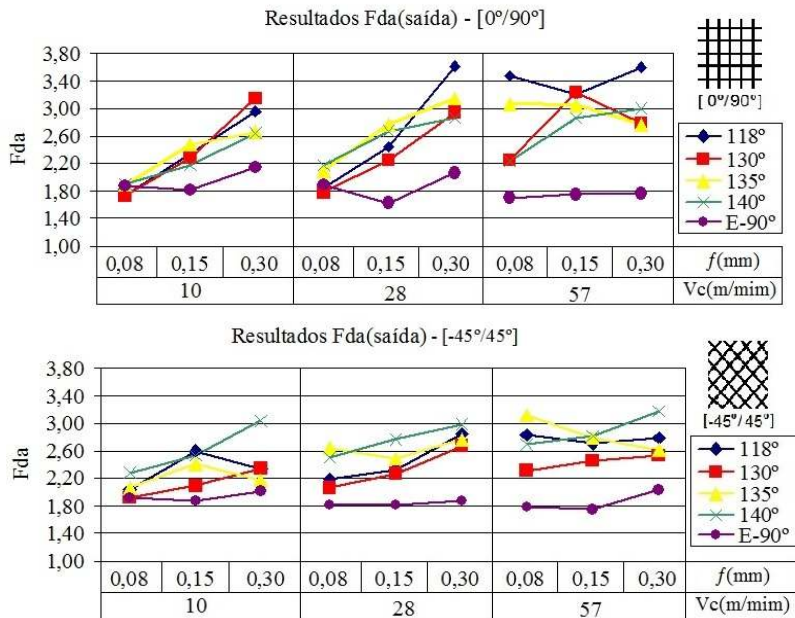
[0°/90°]



[-45°/45°]

Fonte: Autor.

Figura 26: Resultados médios para Fda(saída) – [0°/90°] e [-45°/45°].



Quadro 18: Análise de Variância Fda(saída) para ambos os materiais.

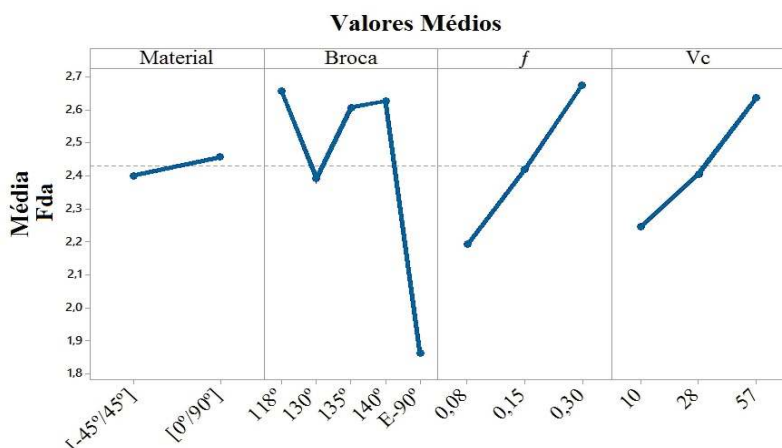
Fonte	GL	SD	MD	Valor-F	Valor-P
Material	1	0,354	0,3543	19,3	0,00
Repetição	4	0,111	0,0278	1,52	0,20
Broca	4	40,315	10,0788	548,9	0,00
f	2	17,522	8,7608	477,12	0,00
v _c	2	11,601	5,8004	315,9	0,00
Material x Broca	4	3,877	0,9693	52,79	0,00
Material x f	2	3,398	1,6989	92,52	0,00
Material x v _c	2	0,544	0,2719	14,81	0,00
Broca x f	8	5,392	0,674	36,71	0,00
Broca x v _c	8	7,984	0,998	54,35	0,00
f x Vc	4	4,336	1,0841	59,04	0,00
Material x Broca x f	8	2,256	0,282	15,36	0,00
Material x Broca x v _c	8	1,822	0,2277	12,4	0,00
Material x f x v _c	4	1,325	0,3313	18,04	0,00
Broca x f x v _c	16	5,309	0,3318	18,07	0,00
Material x Broca x f x v _c	16	1,267	0,0792	4,31	0,00
Error	356	6,537	0,0184		
Total	449	113,95			

Fonte: Autor.

Na furação do material $[0^\circ/90^\circ]$, as brocas 118° , 130° , 135° e 140° apresentaram seus melhores resultados em relação a Fda (saída), com os menores parâmetros de corte, $f=0,08\text{mm}$ e $v_c=10$ e 28m/mim . Seus piores resultados foram com $f=0,30\text{mm}$ e com todas as velocidades de corte e também com $f=0,15\text{mm}$ e $v_c=57\text{m/mim}$.

O pior resultado de Fda(saída) apresentado pela broca E- 90° do ensaio de furação no material $[0^\circ/90^\circ]$ foi com $f=0,30\text{mm}$ e $v_c=10\text{m/mim}$. Nos demais ensaios, a broca E- 90° alcançou estatisticamente os mesmos resultados que as outras brocas testadas nesta pesquisa. No Apêndice F e G pode-se verificar os danos causados na entrada dos furos decorrentes do processo de furação nos materiais $[0^\circ/90^\circ]$ e $[-45^\circ/45^\circ]$, respectivamente. Mesmo sendo uma ferramenta especial para furação de material compósito, e por conta disso, ter apresentado os melhores resultados de Fda (saída), todos os furos realizados com a broca E- 90° formaram muita rebarba. Isso se deve à falta de ruptura total das fibras em ambos os materiais, sendo necessário um pós-processo com outra broca para escarear e limpar os furos. Em uma análise qualitativa dos furos, a broca que gerou menos rebarbas na saída dos furos foi a broca 130° com $f=0,08\text{mm}$ e $v_c=10\text{ m/mim}$. Isso significa que, na prática, uma peça estrutural necessitaria apenas de uma correção manual com lixa. Na Fig. 27, pode-se verificar os principais efeitos que influenciaram nos valores de Fda(saída) para ambos os materiais.

Figura 27: Efeitos principais para Fda(saída).



Fonte: Autor.

Legenda: $f(\text{mm}) - v_c(\text{mm/mim})$

Ao se analisar a Fig. 27, pode-se reafirmar o que já havia sido mencionado anteriormente, ou seja, que há diferenças significativas nos resultados em Fda(saída) para os dois materiais testados. De maneira resumida, em relação à Fda(saída), as brocas 118°, 130°, 135° e 140° em relação à Fda(saída) para ambos os materiais, tendem a piorar seus resultados conforme se aumenta o avanço e/ou velocidade de corte, ou seja, há influência significativa na variação destes parâmetros nos resultados obtidos. A broca E-90° apresentou os melhores resultados, seguido pelas brocas 130° e 135°.

Embora o método Fda seja o que melhor caracteriza a região danificada, foi utilizado o método Fd em algumas situações, com objetivo de comparar os resultados obtidos neste estudo com os resultados de outros pesquisadores. A pesquisa realizada por Kilickap (2010), cujos parâmetros para ensaios de furação em GFRP com uma broca helicoidal de HSS com ângulo de ponta de 118° eram: $f=0,30\text{mm}$ e $v_c=10\text{m/mim}$, apresentou um valor Fd(saída)= 1,70, e, para uma broca helicoidal de HSS-TiN com ângulo de ponta de 135° obteve um Fd(saída)= 1,40. Adotando-se os mesmos parâmetros de corte com a broca 118°, o presente estudo, obteve um Fd(saída)= 2,23 (31% maior) para o material $[0^\circ/90^\circ]$, e um Fd(saída)= 1,78 (4,7% maior) para $[-45^\circ/45^\circ]$. Estes resultados anteriormente citado foi inferior ao alcançado nos experimentos de Kilickap (2010), mas pode ser explicado pelo fato dos materiais possuírem características diferentes, embora o resultado não tenha sido tão significativo para o material $[-45^\circ/45^\circ]$. No caso do ensaio realizado por este estudo, a broca 135° com revestimento de cobre apresentou um Fd(saída)= 2,01 (44% maior) para o material $[0^\circ/90^\circ]$, e Fd(saída)= 1,77 (26% maior) para o material $[-45^\circ/45^\circ]$, ou seja, em ambos os casos os resultados foram inferiores.

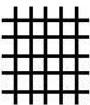

4.2.4 Correlação entre resultados Fda(entrada) e Fda(saída)

Com o intuito de determinar quais parâmetros de corte e geometria da ferramenta gerariam furos com os menores danos no âmbito desta pesquisa, buscou-se correlacionar os resultados entre Fda (entrada) e Fda (saída). Assim, seriam melhores aqueles que apresentassem os menores valores em Fda(entrada) e Fda(saída), e aqueles que gerassem menor quantidade de rebarba por falta de ruptura total dos fios de fibra dos materiais.

O Quadro 19 apresenta os melhores resultados encontrados tanto para Fda (entrada) e Fda (saída) dos mesmos furos, obtidos através dos ensaios de furação dos corpos de prova $[0^\circ/90^\circ]$ e $[-45^\circ/45^\circ]$,

considerando-se as geometrias de todas as brocas e os parâmetros de corte do presente estudo. Com base nesses resultados, foi elaborada a Fig. 28 para melhor entendimento dos resultados encontrados e ressaltar a diferença entre os valores de Fda (entrada) e Fda (saída).

Quadro 19: Melhores resultados para Fda(entrada) e Fda(saída).

Broca	f (mm)	v_c (m/mim)	Fda (entrada)	DP	Fda (saída)	DP	
E-90°	0,15	28	1,13	0,03	1,62	0,01	 [0°/90°]
118°	0,08	10	1,17	0,03	1,73	0,05	
E-90°	0,15	57	1,17	0,01	1,75	0,03	
E-90°	0,30	57	1,18	0,02	1,76	0,04	
E-90°	0,08	57	1,21	0,01	1,71	0,02	
E-90°	0,15	10	1,21	0,02	1,82	0,04	
130°	0,08	10	1,22	0,03	1,73	0,09	
E-90°	0,30	10	1,13	0,02	2,01	0,19	 [-45°/45°]
E-90°	0,30	28	1,16	0,01	1,88	0,11	
E-90°	0,30	57	1,17	0,02	2,04	0,17	
130°	0,08	28	1,20	0,01	2,06	0,06	
118°	0,08	10	1,21	0,02	2,04	0,11	
E-90°	0,15	57	1,23	0,01	1,75	0,08	
130°	0,08	10	1,24	0,04	1,92	0,07	

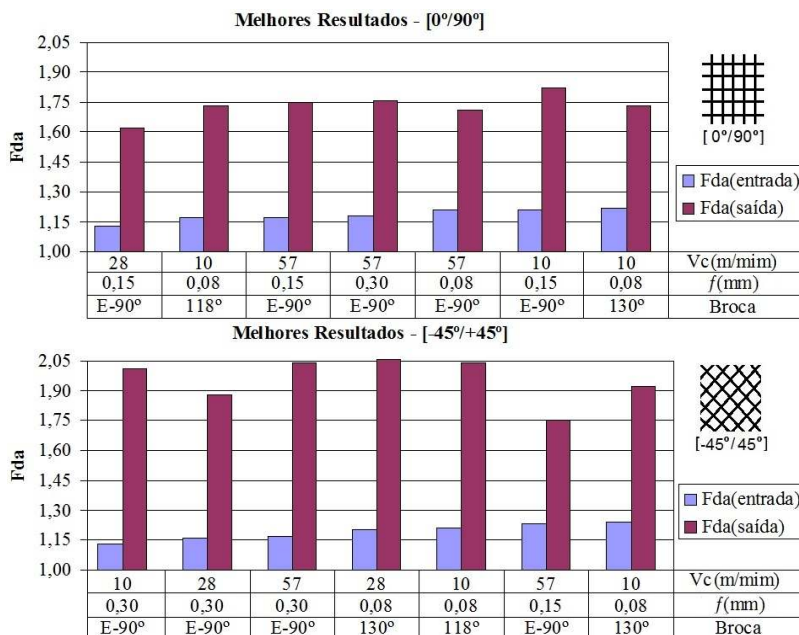
Fonte: Autor.

Sob o ponto de vista da análise estatística, todos os resultados do Quadro 19 são iguais, visto que o nível de confiança no teste de *Tukey* foi de 95%. Os danos causados na entrada dos furos foram menores, pois a força exercida pela broca no início da furação é de compressão. Além disso, os corpos de prova possuíam maior número de camadas de fibra de vidro laminadas que melhor distribuíram as cargas pelo material. No entanto, na saída do furo a broca exerce uma força de tração sobre as camadas laminadas, e não havendo mais camadas para distribuir as cargas, há a tendência de estilhaçar a fibra de vidro.

Os melhores resultados encontrados neste estudo para os danos causados na saída dos furos para o material [0°/90°] foram entre 40% a 50% maiores que os danos causados na entrada. Já para o material [-45°/45°] os danos variaram de 40% a 80%. A broca E-90° representa 64,3% dos melhores resultados, seguida da broca 130° com 21,4% dos resultados e por últimos a broca 118° com 14,3%.

Nos ensaios de furação do material $[0^\circ/90^\circ]$, a broca E-90° gerou melhores resultados com $f=0,15\text{mm}$ para todas as velocidades de corte, exceto para $f=0,08$ e $0,30\text{mm}$, com $v_c=57\text{m/mim}$.

Figura 28: Melhores resultados Fda(entrada) e Fda(saída).



Fonte: Autor.

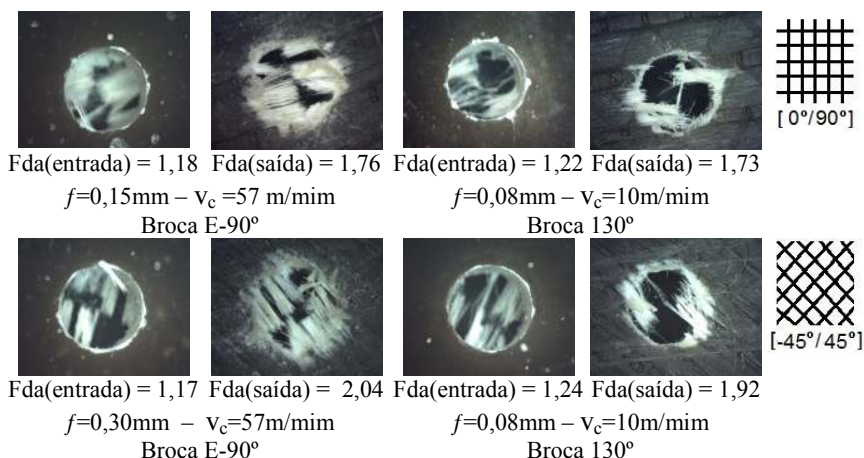
Para o material $[-45^\circ/45^\circ]$ os melhores resultados obtidos aconteceram com $f=0,30\text{mm}$ e em todas as velocidades de corte. Estatisticamente, com $f=0,15\text{mm}$ e $v_c=57\text{m/mim}$, os melhores resultados mostraram-se iguais. A broca 118° e 130° para ambos os materiais obteve seus melhores resultados com $f=0,08\text{mm}$ e $v_c=10\text{m/mim}$. A broca 130° no material $[-45^\circ/45^\circ]$ também obteve bom resultado com o $f=0,08\text{mm}$ e $v_c=28\text{m/mim}$.

No âmbito da presente pesquisa não foi possível eliminar totalmente as rebarbas localizadas nas saídas dos furos, causadas pela falta de ruptura total das fibras, no entanto, através de uma análise comparativa e qualitativa foi possível determinar quais parâmetros de corte e brocas proporcionaram menos rebarbas. Pode-se observar na Fig. 29 as imagens dos furos de saída que apresentam os melhores resultados

deste estudo, para ambos os materiais, mas com diferentes quantidades de rebarba na saída.

Por meio de uma análise qualitativa dos furos pode-se afirmar que a broca 130° utilizada na furação de ambos os materiais com $f=0,08\text{mm}$ e $v_c=10\text{m/mim}$ foi a que apresentou o melhor resultado nesta pesquisa, pois, além de gerar estatisticamente os melhores resultados para Fda(entrada) e Fda(saída), foi a ferramenta que deixou menos rebarbas na saída dos furos, sendo possível eliminá-las facilmente com uma lixamento manual. As brocas E-90° e 118° obtiveram resultados satisfatórios, porém geraram muita rebarba na saída dos furos, necessitando de um pós-processo por meio de escareamento.

Figura 29: Análise comparativa e qualitativa entre furos e materiais.



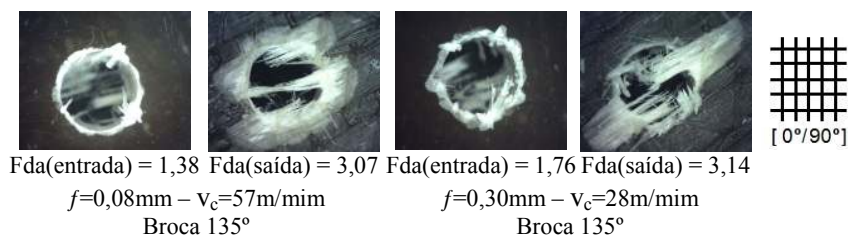
Fonte: Autor.

É válido ressaltar que, mesmo que os danos causados na saída dos furos sejam maiores que os danos causados na entrada dos mesmos, faz-se necessário analisar as duas situações. Há casos em que os furos podem ter o mesmo valor para Fda(saída), porém os valores para Fda(entrada) podem ser bem diferentes. Exemplo: neste estudo, pode-se destacar o caso da broca 135°, com $f=0,08\text{mm}$ e $v_c=57\text{m/min}$, que gerou um Fda(entrada)= 1,38 e Fda(saída)= 3,07, mas, a mesma broca com $f=0,30\text{mm}$ e $v_c=28\text{m/mim}$ acarretou um Fda(entrada)= 1,76 e Fda(saída)= 3,14. Ou seja: sob o ponto de vista da análise estatística, os

Fda(entrada) são distintos. A Figura 30 apresenta as imagens dos furos para ilustrar estes resultados.

As brocas 118°, 130°, 135° e 140° apresentaram seus piores resultados para ambos os materiais, com os maiores avanços e/ou velocidade de corte, gerando furos com grandes regiões danificadas, o que na prática poderia levar pequenas peças ao descarte ou comprometer a vida útil de uma peça estrutural.

Figura 30: Imagens de furos com mesmo Fda(saída).



Fonte: Autor.

No Anexo A, pode-se verificar uma das principais aplicações do processo de furação na indústria náutica, que consiste na união estrutural das principais partes da embarcação. Nestes casos essas rebarbas na saída dos furos sofrem um pós-processo com escareador ou lixamento manual, com o objetivo de melhorar a qualidade dos furos, que posteriormente receberão elementos de fixação como parafusos ou rebites.

4.2.5 Comparativo entre os corpos de prova

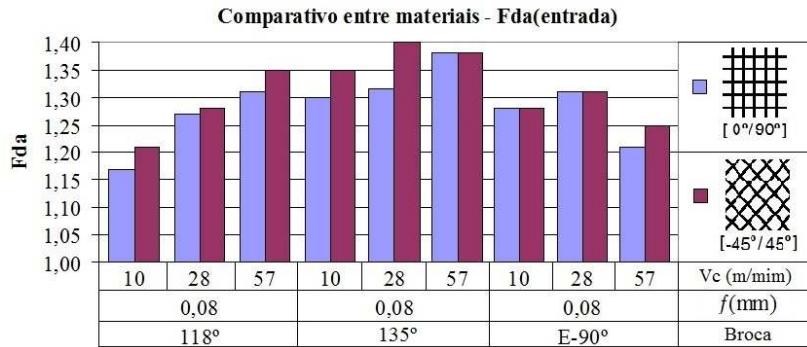
Por possuírem diferentes orientações e gramatura foi realizada uma análise comparativa nos materiais [0°/90°] e [-45°/45°], com o objetivo de verificar se estes sofrem as mesmas influências dos parâmetros de corte e geometria da ferramenta. A análise de variância para Fda (entrada), que pode ser observada no Quadro 16, mostra que a diferença entre os materiais não gerou influência significativa nos resultados, pois o valor-p é maior que 0,05. A Fig. 31 ilustra a comparação dos resultados para ambos os materiais com os mesmos parâmetros de corte e geometria da ferramenta.

Estatisticamente, os corpos de prova [0°/90°] e [-45°/45°] proporcionaram os mesmos resultados para Fda (entrada). Isto deve-se

ao fato dos materiais serem compostos inicialmente por três camadas do mesmo tipo de reforço (descontínuo e desorientado) e mesma fração volumétrica de fibra no laminado, o que causou praticamente as mesmas influências nos parâmetros de corte e geometria da ferramenta. Budan *et al.* (2011) afirmam que a fração volumétrica de fibra do laminado tem influência direta na região danificada ao redor dos furos, de forma que quanto maior a fração volumétrica de fibra, pior a qualidade dos furos.

A Fig. 31 mostra que nos ensaios de furação com $f=0,08\text{mm}$, as brocas 118°, 135° e E-90° não apresentaram diferenças significativas nos resultados para Fda (entrada), se comparados os materiais $[0^\circ/90^\circ]$ e $[-45^\circ/45^\circ]$, sendo que a maior diferença encontrada foi com a broca 135° com $v_c=28\text{m/mim}$ em que o material $[0^\circ/90^\circ]$ resultou em um Fda (entrada) 6% menor que o material $[-45^\circ/45^\circ]$.

Figura 31: Comparativo Fda(entrada) entre $[0^\circ/90^\circ]$ e $[-45^\circ/45^\circ]$.



Fonte: Autor.

Para as brocas E-90° e 118°, a maior diferença no Fda (entrada) para os materiais foi de 3,5% para ambas. Com o teste de Tukey, foi possível afirmar que os valores de Fda(entrada) são estatisticamente iguais para os ambos os materiais, com nível de confiança de 95% para os ensaios realizados com as mesmas condições de corte e geometria da ferramenta.

A variação dos materiais $[0^\circ/90^\circ]$ e $[-45^\circ/45^\circ]$ possui influência significativa nos resultados em Fda (saída). Esta afirmação pode ser verificada pela análise de variância dos resultados apresentada no Quadro 18. A Fig. 32 e 33 ilustra a comparação dos resultados para os

materiais $[0^\circ/90^\circ]$ e $[-45^\circ/45^\circ]$ com os mesmos parâmetros de corte e geometria da ferramenta.

Em Fda (saída), as características dos materiais, tais como, orientação e gramatura das fibras têm influência significativa nos resultados, visto que nos ensaios realizados no material $[0^\circ/90^\circ]$ com a broca 118° , com $v_c=57\text{m/mim}$ e/ou $f=0,30\text{mm}$, geraram os piores resultados que variaram de 18 a 29% a mais que no material $[-45^\circ/45^\circ]$. As brocas 130° e 135° proporcionaram piores resultados para o material $[0^\circ/90^\circ]$ com $f=0,15$ e $0,30\text{mm}$ com $v_c=57$ e 10m/mim , gerando um Fda(saída) de aproximadamente 32% a mais que o outro material.

Figura 32: Comparativo Fda(saída) entre $[0^\circ/90^\circ]$ e $[-45^\circ/45^\circ]$.

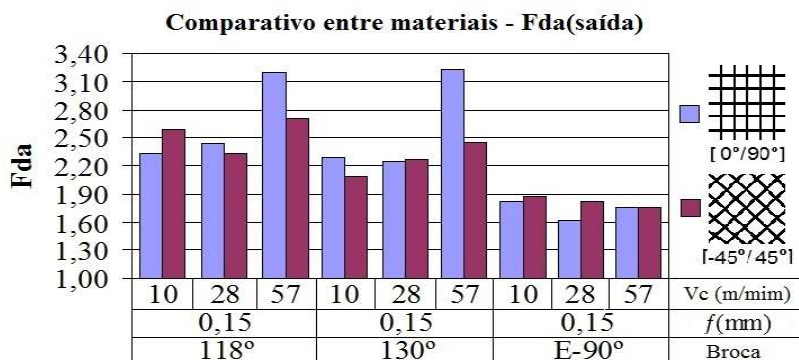
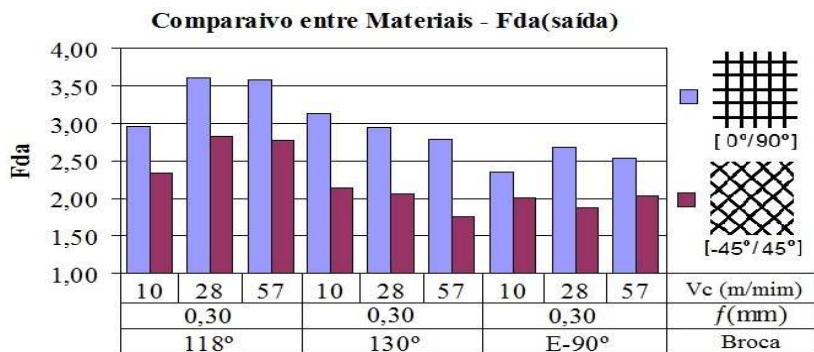


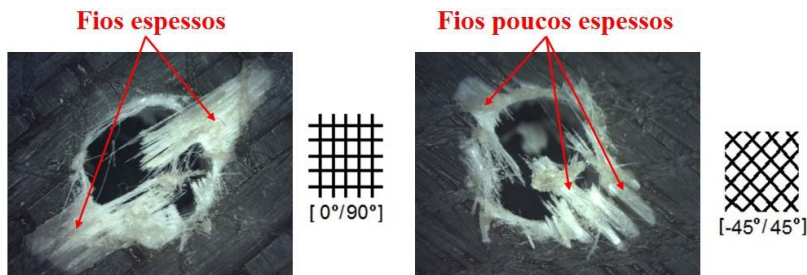
Figura 33: Comparativo entre materiais - Fda(saída) e $f=0,30\text{mm}$.



Fonte: Autor.

No caso de furação no material $[0^\circ/90^\circ]$ com a broca 140° , com $f=0,08\text{mm}$ e $v_c=10$ e 57m/mim obteve-se resultados diferentes e que se mostraram 20% melhores. A broca $E-90^\circ$ proporcionou resultados estatisticamente iguais para ambos os materiais. A Fig. 34 mostra a diferença entre os tipos de rebarbas geradas na saída dos furos dos materiais, devido a não ruptura total das fibras.

Figura 34: Diferentes espessuras de rebarba nos materiais.



Fonte: Autor.

Por possuir maior quantidade de fibra de vidro que o material $[-45^\circ/45^\circ]$, no material $[0^\circ/90^\circ]$, a ponta da broca tende a empurrar mais os fios de fibra antes que estes sejam cortados, gerando poucas rebarbas, mas, mais espessas e com maior comprimento de delaminação. No caso do material $[-45^\circ/45^\circ]$ em que havia menor quantidade de fibra de vidro, a furação gerou mais rebarbas, poucos e não tão longas, que resultou em uma área danificada menor, que pode ser facilmente corrigida com lixamento.

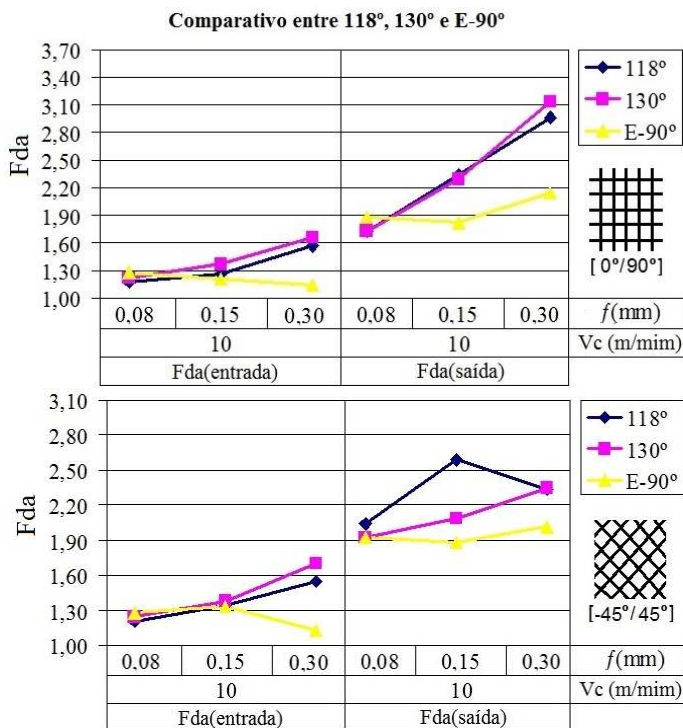
Depois de realizada a caracterização da influência da diferenças dos materiais nos resultados em Fda (entrada) e Fda (saída), o item a seguir trata da influência da variação da geometria da ferramenta e dos parâmetros de corte nos danos causados na entrada e saída dos furos.

4.2.6 Comparativo entre as brocas

Para melhor caracterizar a influência das brocas sobre os resultados em Fda(entrada) e Fda(saída) e verificar a influência das diferentes combinações dos parâmetros de corte sobre estes resultados buscou-se examinar comparativamente as brocas utilizadas neste estudo. Dos cinco tipos de brocas, foram escolhidas para análise as brocas 118° , 130° e $E-90^\circ$, pois estas apresentaram os melhores resultados nesta

pesquisa. A Fig. 35 mostra a influência da geometria das brocas em relação a variação do avanço com $v_c=10\text{m/mim}$, nos corpos de prova $[0^\circ/90^\circ]$ e $[-45^\circ/45^\circ]$.

Figura 35: Comparativo entre brocas - $v_c=10\text{m/mim}$.



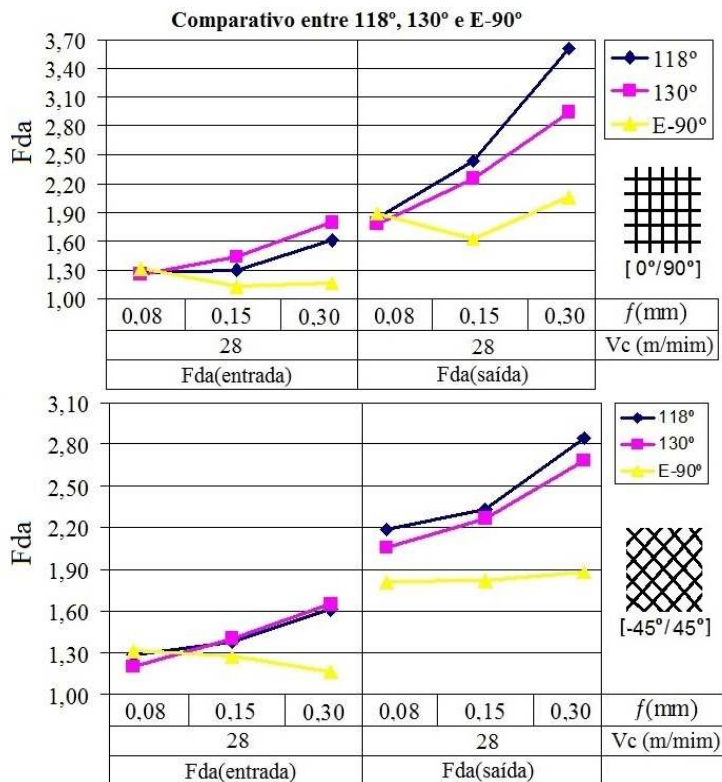
Fonte: Autor.

Para ambos os materiais, as brocas 118°, 130° e E-90° com $f=0,08\text{mm}$ e $v_c=10\text{m/mim}$, estatisticamente, geraram os mesmos valores para Fda(entrada) e Fda(saída). As brocas 118° e 130° apresentaram um aumento de Fda(entrada) de aproximadamente 10% para $f=0,15\text{mm}$, e de 30% para $f=0,30\text{mm}$ para os materiais $[0^\circ/90^\circ]$ e $[-45^\circ/45^\circ]$. Para $f=0,08$ e $0,15\text{mm}$, estatisticamente, a broca E-90° gerou os mesmos resultados para Fda (entrada) para ambos os materiais, com nível de confiança de 95%, e obteve uma melhora de 12% para o $f=0,30\text{mm}$.

Através do teste de Tukey pode-se afirmar que a broca E-90° proporcionou estatisticamente os mesmos resultados para Fda(saída)

para todas as faixas de avanço com $v_c=10\text{m/mim}$. As brocas 118° e 130° proporcionaram estatisticamente as mesmas variações em $F_{da}(\text{saída})$, para o material $[0^\circ/90^\circ]$, sendo que os resultados pioraram em aproximadamente 32% para o $f=0,15\text{ mm}$, e 70% para $f=0,30\text{ mm}$. No material $[-45^\circ/45^\circ]$, a broca 118° apresentou um aumento em $F_{da}(\text{saída})$ de 27% para o $f=0,15\text{mm}$ e 14% para $f=0,30\text{mm}$. A broca 130° apresentou um aumento de 9% e de 22% para os $f=0,15$ e $0,30\text{mm}$ respectivamente. A Fig. 36 mostra a influência da geometria da broca com variação do avanço em relação à $v_c=28\text{m/mim}$ na furação dos corpos de prova $[0^\circ/90^\circ]$ e $[-45^\circ/45^\circ]$.

Figura 36: Comparativo entre brocas - $v_c=28\text{ m/mim}$.



Fonte: Autor.

As brocas 118°, 130° e E-90° nos ensaios de furação nos materiais [0°/90°] e [-45°/45°] com $f=0,08\text{mm}$ e $v_c=28\text{m/mim}$ apresentaram estatisticamente os mesmos valores para $Fda(\text{entrada})$. Com a utilização do $f=0,15\text{mm}$, a broca E-90° gerou um $Fda(\text{entrada})= 1,13$ que é aproximadamente 15% menor que o resultado que a broca 118° apresentou, e 24% menor que a broca 130° para o material [0°/90°]. No material [-45°/45°], a broca E-90° estatisticamente, apresentou o mesmo resultado que a broca 118°, no entanto, obteve um resultado 10% melhor do que a broca 130°. Nos ensaios com o $f=0,30\text{mm}$ e $v_c=28\text{m/mim}$, esta mesma broca gerou resultados em $Fda(\text{entrada})$ muito superiores aos realizados pelas outras brocas: foi 38% melhor que a broca 118° e 58% melhor que a broca 130° nos ensaios realizados no material [0°/90°]. No material [-45°/45°], as brocas 118° e 130° apresentaram os mesmos resultados, aproximadamente 38% pior do que a broca E-90° que obteve um $Fda(\text{entrada}) = 1,16$.

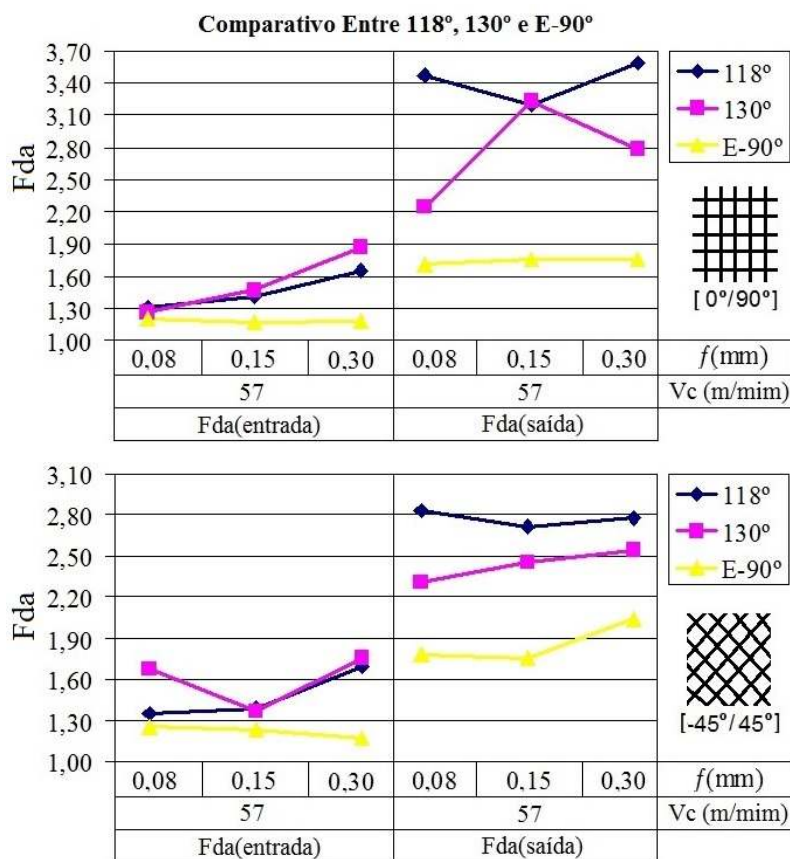
Nos resultados de furação do material [0°/90°] com $Fda(\text{saída})$ e com $f=0,08\text{mm}$, as brocas 118°, 130° e E-90° geraram os mesmos resultados. Entretanto, no material [-45°/45°], a broca E-90° foi 13,5% melhor do que os resultados obtidos com a broca 118° e 21% melhor que a broca 130°. Com o aumento do avanço para 0,15mm, a broca E-90° mantiveram estatisticamente os mesmos resultados obtidos com o $f=0,08\text{mm}$, para ambos os materiais. No material [0°/90°] a broca 118° e 130° proporcionou o mesmo valor para $Fda(\text{saída})$ que foi aproximadamente 35% pior que a broca E-90°. Já no material [-45°/45°] a broca 118° e 130° tiveram um $Fda(\text{saída})$ 25% maior que a broca E-90°.

Para os ensaios com $f=0,30\text{mm}$, as brocas 118° e 130° apresentaram resultados muito inferiores ao da broca E-90° para ambos os materiais. No material [0°/90°], a broca 118° obteve um $Fda(\text{saída})$ 74% pior que a broca E-90° e 22% pior que a broca 130°. No material [-45°/45°] as brocas 118° e 130° geraram, estatisticamente, um $Fda(\text{saída})$ que foi aproximadamente 40% pior que os resultados obtidos com a broca E-90°. Para os ensaios com $v_c=28\text{m/mim}$ a broca E-90° obteve, estatisticamente, os mesmos valores para todas as faixas de avanço e para ambos os materiais desta pesquisa. A Fig. 37 mostra a influência da geometria da broca com variação do avanço em relação à $v_c=57\text{m/mim}$ na furação dos corpos de prova [0°/90°] e [-45°/45°].

As brocas 118°, 130° e E-90° produziram os mesmos $Fda(\text{entrada})$ para $f=0,08\text{mm}$ e $v_c=57\text{m/mim}$ nos ensaios realizados em [0°/90°]. Todavia, no material [-45°/45°], as brocas 118° e E-90° apresentaram os mesmos resultados enquanto que a broca 130° obteve

um Fda(entrada) 23% maior que a broca 118°. Nos ensaios realizados com o $f=0,15\text{mm}$ e $v_c=57\text{m/mim}$, as brocas 118° e 130° apresentaram, estatisticamente, os mesmos resultados para ambos os materiais. A broca E-90° obteve os mesmos Fda(entrada) para ambos os materiais e mostrou-se aproximadamente 10% melhor que as brocas 118° e 130°. As brocas 118°, 130° e E-90° obtiveram o mesmo Fda (entrada) para os dois materiais, no entanto para Fda(saída) as brocas proporcionaram diferentes resultados, onde a broca E-90° obteve aproximadamente 40% melhor que a broca 118° e 50% melhor que a broca 130°.

Figura 37: Comparativo entre brocas - $v_c=57\text{m/mim}$.

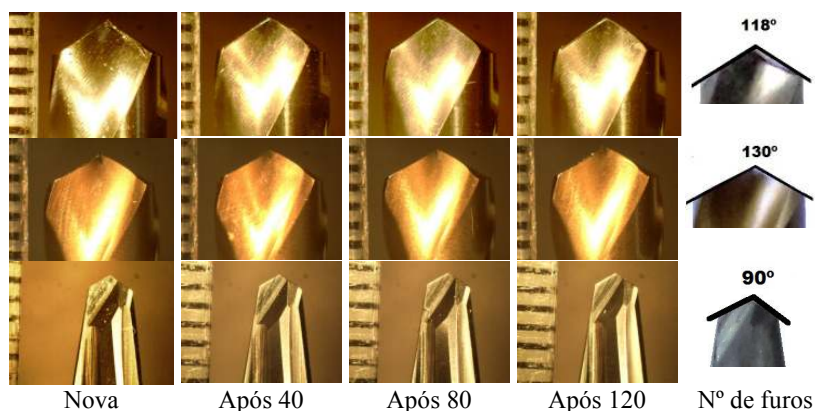


Fonte: Autor.

Em relação ao Fda (saída), a broca E-90° apresentou, estatisticamente, os mesmos resultados para todas as faixas de avanço com a $v_c=57\text{m/mim}$, para os materiais $[0^\circ/90^\circ]$ e $[-45^\circ/45^\circ]$. A broca 118° obteve os mesmos resultados para os ensaios no material $[0^\circ/90^\circ]$ em todas as faixas de avanço, todavia em $[-45^\circ/45^\circ]$ os resultados foram 18% melhor que no outro material. A broca 130° proporcionou os mesmos resultados para o material $[-45^\circ/45^\circ]$ em todas as faixas de avanço, entretanto no material $[0^\circ/90^\circ]$ os resultados foram diferentes para cada avanço: para $f=0,08\text{mm}$ com $v_c=57\text{m/mim}$ acarretou um Fda(saída) 43% melhor que os resultados em $f=0,15\text{mm}$ e 24% melhor que $f=0,30\text{mm}$.

Na Fig. 38 pode-se observar o estado das brocas 118°, 130° e E-90° desde o estado de novas e após os furos 40, 80 e 120.

Figura 38: Estado das brocas 118°, 130° e E-90°.



Fonte: Autor.

As brocas não apresentaram um desgaste acentuado, no gume e nem no flanco da ferramenta. Isto pode ser explicado devido às condições de corte e à quantidade de furos realizados por cada broca, que foi no máximo de 120 furos. As brocas novas foram usadas para os ensaios com as combinações dos parâmetros de corte, nas condições mínima, média e máxima. Analisando os resultados obtidos em Fda(entrada) e Fda(saída), não é possível notar uma grande influência do desgaste da broca nos resultados, sendo que as maiores influências foram do avanço e geometria da ferramenta. Para uma melhor caracterização do desgaste da ferramenta seria necessário realizar mais

furos com os mesmos parâmetros de corte para notar a influência que o desgaste acarreta nos valores de F_{da} (entrada) e F_{da} (saída).

Com os resultados destes experimentos foi possível determinar para os diferentes materiais quais as melhores geometrias da ferramenta devem ser escolhidas e quais os melhores parâmetros de cortes devem ser adotados para obter furos com regiões pouco danificadas. Através destes resultados também foi possível perceber que o avanço é o fator que tem maior influência nos resultados e a velocidade de corte em determinadas situações pode ser aumentada ou reduzida buscando obter a velocidade de corte adequada para uma vida útil da ferramenta e um ganho na produtividade.

Mesmo possuindo os materiais diferentes massas pode-se obter as mesmas concentrações de fibras, permitindo assim um estudo voltado exclusivamente para a diferença entre gramatura e orientações das fibras, além de analisar as influências que esta acarreta nas propriedades mecânicas e qualidades dos furos realizados. O material $[0^\circ/90^\circ]$ possuem propriedades mecânicas superiores, todavia quando usinados com maiores velocidades de corte e avanços acarretam maiores danos nas saídas dos furos do que o material $[-45^\circ/45^\circ]$.

De modo geral, a broca 118° apresentou melhores resultados na entrada dos furos do que a broca 130° , em razão da geometria da sua ponta ser menor, o que provoca menor contato do gume da ferramenta com a peça a ser usinada. Como resultado, a broca 118° tende a danificar uma região menor da furação. Em contrapartida, na saída da furação, esta mesma ponta acaba empurrando as camadas do laminado antes de serem totalmente usinadas, o que provoca uma delaminação maior do que a broca 130° .

Foi possível também verificar que a broca $E-90^\circ$ apresentou resultados satisfatórios para todas as faixas estudadas, especialmente para $f=0,15\text{mm}$ e $v_c=28\text{ m/mim}$ para o material $[0^\circ/90^\circ]$, e $f=0,30\text{mm}$ e $v_c=57\text{m/mim}$ para o material $[-45^\circ/45^\circ]$. A broca $E-90^\circ$ possui uma geometria especial, com grande comprimento de gume e com um pequeno ângulo de ponta, estes tende a proporcionar uma menor região danificada na entrada dos furos, pois possui um menor contato do gume com a peça usinada. Na saída dos furos dos corpos de prova deste experimento a ponta da broca $E-90^\circ$ antes da broca ultrapassar o final do material a ser usinado, o furo ainda não obteve o diâmetro final desejado, devido ao seu grande comprimento do gume, além de obter quartos gumes secundários cortantes que induzem menores solicitações, assim diminuindo a região danificada na saída.

As brocas 118° e 130° proporcionaram seus melhores resultados para os menores parâmetros de corte, com $f=0,08\text{mm}$ e $v_c=10\text{m/mim}$ para ambos os materiais. As brocas mostraram que a variação dos parâmetros de corte tem praticamente as mesmas influências sobre seus resultados em $Fda(\text{entrada})$ e $Fda(\text{saída})$. Dentre os melhores resultados estatisticamente iguais para $Fda(\text{saída})$ 11% foram proporcionados pela da broca 118°, 15% pela broca 130° e 63% para a broca E-90°. Todavia para $Fda(\text{entrada})$ a broca 118° acarretou 10,5% dos melhores resultados, a broca 130° proporcionou 21% e 58% para a broca E-90°. As brocas 118° e 130° tiveram estatisticamente os mesmos resultados para 72% dos ensaios. Estes valores foram obtidos através do teste de *Tukey* com nível de confiança de 95%.

Com os resultados obtidos nestes experimentos foi possível obter algumas conclusões sobre as influências das variáveis do processo sobre os resultados, estas serão apresentadas no capítulo a seguir.

5 CONCLUSÃO

O método Fd proposto por Davim (2003) é o mais difundido entre os pesquisadores que visam quantificar a região danificada ao redor dos furos usinados em laminados reforçado com fibra, mesmo não sendo o método que melhor quantifica a região danificada. Esta constatação se confirmou nesta pesquisa, devido à realização de uma análise e aplicação de diferentes métodos propostos por outros pesquisadores em imagens dos mesmos furos. Assim, comparando os resultados de cada método, com estes resultados conclui-se que o método “Fda” proposto por Davim *et al.* (2007) é o que melhor representou a região danificada ao redor dos furos nesta pesquisa.

A escolha da gramatura dos materiais e a orientação das fibras são de suma importância, pois estes influenciam na qualidade dos furos e na resistência mecânica dos materiais. Concluiu-se que o material $[0^\circ/90^\circ]$ possui resistência à tração que é de aproximadamente 40% maior que o material $[-45^\circ/45^\circ]$. Em relação à resistência ao impacto o material $[0^\circ/90^\circ]$ acarretou uma resistência 35% maior que o outro material.

Os corpos de prova $[0^\circ/90^\circ]$ e $[-45^\circ/45^\circ]$ produziram, do ponto de vista estatístico, os mesmos resultados para Fda (entrada). Isto ocorreu devido ao fato de que os materiais laminados eram compostos por três camadas iniciais laminadas com o mesmo tipo de reforço (descontínuos e desorientados), de forma que sofreram praticamente as mesmas influências dos parâmetros de corte e geometria da ferramenta. Nas demais camadas, no caso do material laminado $[0^\circ/90^\circ]$ que possuía gramatura maior observou-se que a ponta da broca tende a empurrar mais os fios de fibra antes que estes sejam cortados, gerando assim pouca quantidade de rebarba de fios, porém mais espessos e com maior comprimento delaminado. No caso do material $[-45^\circ/45^\circ]$ em que a gramatura era menor, a furação produz maior quantidade de fios delaminados, entretanto, pouco espessos e não tão longos, caracterizando uma menor região danificada, o que na prática, é mais fácil corrigir por um pós-processo.

As brocas 118° , 130° , 135° e 140° apresentaram seus piores resultados de Fda (entrada), para os materiais $[0^\circ/90^\circ]$ e $[-45^\circ/45^\circ]$ nos experimentos realizados com os maiores parâmetros de corte de $f=0,30\text{mm}$ e $v_c=57\text{m/mim}$. Todavia estas brocas proporcionaram seus melhores resultados para o $f=0,08\text{mm}$ e $v_c=10\text{m/mim}$. A broca 118° apresentou melhores resultados em Fda (entrada) do que a broca 130° . Isso pode ter ocorrido por causa do menor ângulo de ponta da primeira

broca, que proporciona menor contato do gume da ferramenta com a peça a ser usinada, assim possivelmente resultando em uma menor região danificada. Em contrapartida, a ponta da broca com menor ângulo de ponta tende a gerar mais solicitação entre as camadas nas saídas dos furos, assim justificando o motivo pelo qual a broca 118° apresenta maior delaminação na saída do que a broca 130°.

Com relação à broca E-90°, seus piores resultados foram obtidos com os parâmetros $f=0,08\text{mm}$ e $v_c=10$ e 28m/mim . Em decorrência de algumas diferenças nas influências em que a variação da geometria das brocas e dos parâmetros de corte proporcionam nos resultados em Fda(entrada) e Fda(saída), verificou-se que a broca E-90° apresentou bons resultados para todas as faixas estudadas, conforme esperado pelo autor devido a broca ser desenvolvida para furação de materiais compósitos, especialmente para $f=0,15\text{mm}$ e $v_c=28\text{m/mim}$, em se tratando da usinagem do material $[0^\circ/90^\circ]$ e para o material $[-45^\circ/45^\circ]$ $f=0,30\text{mm}$ e $v_c=57\text{m/mim}$.

No âmbito da presente pesquisa não foi possível eliminar totalmente as rebarbas localizadas nas saídas dos furos por falta de ruptura total das fibras. No entanto, por meio de uma análise comparativa e qualitativa, foi possível verificar que a broca 130° com o $f=0,80\text{mm}$ e $v_c=10\text{mm/mim}$ produziu furos com menor quantidade de rebarbas na saída, o que pode ser facilmente corrigido por um processo de lixamento manual. Para obter furos livres de rebarbas, onde se devem realizar outras pesquisas com diferentes processos de usinagem, parâmetros de corte e geometria de ferramentas. É válido ressaltar que estes resultados foram obtidos em furos realizados em um centro de usinagem. Todavia a furação manual pode proporcionar diferentes resultados.

De maneira geral, as brocas não apresentaram um desgaste acentuado, nem no gume e nem no flanco da ferramenta. Isto pode ser explicado devido às condições de corte e a quantidade de furos realizados por cada broca. Entretanto, para uma melhor caracterização do desgaste da ferramenta, seria necessário realizar mais furos com os mesmos parâmetros de corte para que se pudesse verificar a influência que o desgaste acarretaria nos valores de Fda(entrada) e Fda(saída) para um mesmo experimento.

Entende-se que o conjunto de resultados obtidos neste estudo que teve como objetivo verificar quais das brocas e os parâmetros de corte estudados seriam mais adequada para realizar furações em laminados construídos com polímeros reforçados com fibra de vidro. Assim esta pesquisa apresenta contribuições relevantes para a indústria náutica e

outras áreas que utilizam estes tipos de materiais, sejam na escolha dos tipos de ferramentas de furação e condições de cortes ou na definição dos parâmetros de usinagem. De modo a proporcionar uma maior qualidade nos furos isto em termos de diminuição do tamanho da delaminação e na formação de rebarbas. Desta maneira se entende que os objetivos do trabalho foram alcançados com sucesso.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Conforme citado anteriormente, com o presente estudo não foi possível realizar furos livres de rebarba por falta de ruptura dos fios. Seguem abaixo algumas sugestões de trabalhos futuros que poderão ser realizados:

- Realizar experimentos com diferentes parâmetros de corte, como menores avanços e velocidade de corte, visando obter furos livres de rebarba e danos ao redor dos furos;
- Analisar o desgaste do gume e do flanco da ferramenta e suas influências nas regiões danificadas, além de determinar a vida útil da ferramenta e relação custo-benefício das diferentes geometrias das brocas;
- Estudar o impacto da região danificada pelo processo de furação, na resistência mecânica dos corpos de prova e de sua vida útil;
- Analisar a influência do processo de furação em diferentes tipos e frações volumétricas de fibras, de resina e processos de fabricação.
- Propor novos projetos de brocas e/ou etapas de processo para obter furos livres de danos.

REFERÊNCIAS

- ACOBAR, Associação de Brasileira de Construtores de Barcos e seu Implementos. Indústria Náutica Brasileira – Fatos e Números 2012. Acesso em 05 de outubro de 2013. no site: www.acobar.org.br.
- ALMEIDA, S. P. S. Avaliação das propriedades mecânicas de compósitos pultrudados de matriz polimérica com reforço de fibra de vidro. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.
- ALVAREZ, A. A.; SILVEIRA, J. J. L.; SOARES, B. G.; BORGES, L. S. A. Avaliação da delaminação na furação de materiais compósitos com matriz de resina epóxi modificada. 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Penedo – RJ, 2013.
- ALVAREZ, A. A.; SILVEIRA, J. L. L.; GUENTHER, B. S.; BORGES, L. M. S. A. Analysis of the drilling delamination of composite materials. 1st Brazilian Conference on Composite Materials - BCCM1 Natal-RN, 2012.
- BABU, J.; SUNNY, T. Optimization of Process Parameters in Drilling of GFRP Composites Drilled by an End Mill. – International Journal of Recent Development in Engineering and Technology, V.1, 2013.
- BARBI, Luís F. T.. Representante Comercial da empresa Texiglass. Tecidos técnicos para laminação. Painel Náutico – Santa Catarina, 2011.
- BARRACUDA. Laminação manual versão online: Acesso em 18 de Julho de 2014.
<http://www.barracudacomposites.com.br/pdf/laminacaomanual.pdf>
- BLASS, A. Processamento de Polímeros. Editora da UFSC, 1988.
- BRINKSMEIER, E.; FANGMANN, S.; RENTSCH, R. Drilling of composites and resulting surface integrity Manufacturing Technology 60 pág 57-60, 2011.
- BUDAN, D. A.; BASAVARAJAPPA, S.; KUMAR, M. P.; JOSHI, A. G. Influence of fiber volume reinforcement in drilling GFRP laminates. Journal of Engineering Science and Technology, V. 16, 2011.
- CALLISTER, W. J. D. Ciência e engenharia de materiais, uma introdução. Quinta edição, 2002.
- CALVOPÍÑA, F. L. R. Propuesta técnica del proceso de laminado manual en plástico reforzado con fibra de vidrio (prfv) en la

- fabricación de elementos utilitários. Universidad Internacional do Ecuador, Loja, Ecuador, 2013.
- CARNIZELLI, A. Diretor Técnico da Empresa Cray Valley. Pacote Náutico – Paineis Náuticos – Santa Catarina, 2011.
- CAVALCANTI, W. S. Compósitos poliéster/tecidos tramados vegetalvidro: caracterização mecânica e simulação da sorção de água. Pós-graduação em engenharia de processos. Universidade Federal de Campina Grande, 2006.
- DAVIM, J. P.; REIS, P.; ANTÔNIO, C. C. Drilling fiber reinforced plastics (FRPs) manufactured by hand lay-up: influence of matrix (Viapal VUP 9731 and ATLAC 382-05). *Materials processing technology*, pág. 1828 – 1833, 2004.
- DAVIM, J. P.; REIS, PEDRO. Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments. *Composite Structures* 59 pag. 481–487, 2003.
- DAVIM, J. P.; RUBIO, J. C.; ABRAO, A. M. A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates. *Composites Science and Technology* 67 pag. 1939–1945, 2007.
- DURÃO, L. M. P.; GONÇALVES, D. J. S.; ALBUQUERQUE, V.H.C.; TAVARES, J. M. R. S. Avaliação de ferramentas para a furação de laminados. 8º Congresso Nacional de Mecânica Experimental. Guimarães, 2010.
- DURÃO, L. M. P.; MAGALHÃES, A. G.; MARQUES, A.T.; TAVARES, J. M. R. S. Avaliação do dano em laminado carbono/epóxi após a furação. Jornada Luso-Brasileira de Ensino e Tecnologia em Engenharia. Porto Alegre, 2006.
- FEITO, N.; ÁLVAREZ, J. D.; ÁLVAREZ, A. D.; CANTERO, J. L.; MIGUÉLEZ, M. H. Experimental Analysis of the Influence of Drill Point Angle and Wear on the Drilling of Woven CFRPs *Materials* 2014, 7, 4258-4271.
- FERREIRA, C. A.; BORGES, S. G.; CARNEIRO, P. S.; TRINDADE, R. S.; LEITE, P. A. M. Avaliação da influência de diferentes cargas no tempo de cura e temperatura de cura de resinas poliéster instauradas por intermédio de curvas exotérmicas - Paraná, Brasil, 2006.
- FILHO, A. C. P.; Sousa, S. R. M.; Dutra, M. S. Um estudo sobre materiais compósitos e sua aplicação na produção de dutos para perfuração de petróleo. 5º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. MG, Brasil, 2009.

- FONSECA, M. M. Arte Naval I, Serviço de documentação da marinha, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- GEHLEN, L. R. Efeito da utilização de fibras lignocelulósicas (açai e curauá) em compósitos com matriz de resina poliéster insaturado. Pós-graduação em Eng. Materiais. UFP, 2014.
- GONÇALVES, D. J. S. Avaliação de ferramentas e condições de corte na furação de laminados compósitos. Faculdade de engenharia da universidade do Porto, Portugal, 2010.
- IMAGEJ, *software* de domínio público da *National Institute of Health* dos Estados Unidos, 2014. Disponível no link: <http://imagej.nih.gov/ij/download.html>.
- IMAPES, Revista Científica. – v. 5, n.5, Sorocaba, SP, 2007.
- JAYABAL, S.; NATARAJAN U. Influence of cutting on thrust and torque in drilling of E-glass/polyester composites. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. Vol 17, Pág: 463 - 470, 2010.
- KARIMI, N. Z.; HEIDARY, H.; AHMADI, M. Residual tensile strength monitoring of drilled composite materials by acoustic emission. *Materials and Design* 40 229–236, 2012.
- KHASHABA¹ U. A., EI-SOBATY IA, SELMY AI, MEGAHED A.A. Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: part I – effect of machining parameters. *Composites: Part A*, 2010; v. 41, p. 391–400.
- KHASHABA² U. A., EI-SOBATY IA, SELMY AI, MEGAHED A. A. Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: part II – effect of drill wear. *Composites: Part A*, v. 41, p. 1130–1137, 2010.
- KHASHABA, U. A. Delamination in drilling GRF thermoset composites, *Composites Structures* 63, pág. 313 – 327, 2004.
- KHASHABA, U. A. Drilling of matrix composite: A review – *Journal of composites materials* 47 pág. 1817-1832, 2012.
- KILICKAP, E. Determination of optimum parameters on delamination in drilling of GFRP composites by Taguchi method. *Indian Journal of Engineering and Materials Science*, v.17, p. 265 – 274, 2010.
- KISHORE, R. A.; TIWARI, R.; E SINGH I. Investigation of drilling in [0/90/0]s glass fibre reinforced plastics using taguchi method. *Advances in Production Engineering e Management* 4, 1-2, p. 37-46, 2009.
- KNOPS, M. Analysis of failure in fiber polymer laminates. Editora Springer. New York, EUA, 2008.

- KRISHNARAJ, V.; PRABUKARTHI, A.; RAMANATHAN, A.; ELANGHOVAN, N.; SENTHIL, M. K.; ZITOUNE, R.; DAVIM, J.P. Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates. *Composites: Part B* 43, 1791–1799, 2012.
- KRISHNARAJ, V. Effects of Drill Points on Glass Fibre Reinforced Plastic Composite While Drilling at High Spindle Speed. *Associação Internacional de Engenheiros*, v. 2, 2008.
- LAZAR, M. B.; XIROUCHAKIS, P. Experimental analysis of drilling fiber reinforced composites. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 51, p. 937 – 946, 2011.
- LIU, D.; TANG Y.; CONG, W. L. A review of mechanical drilling for composite laminates. *Composite Structures* 94, pág. 1265-1279, 2012.
- MINITAB 17, Software estatístico, 2014. Disponível no link: <http://it.minitab.com/pt-br/products/minitab/free-trial.aspx>
- MOHAN, N. S.; KULKARNI, S. M.; RAMACHANDRA. A. Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials. *Journal of Materials Processing Technology* 186 265–271, 2007.
- MORETTIN, P. A. Estatística Básica. Ed. Saraiva, São Paulo, 2013.
- NASSEH, J. Barcos Métodos Avançados de Construção em Composites. Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- NASSEH, J. Manual de construções de barcos. Rio de Janeiro, Brasil, 2004.
- NASSEH, J. Técnica e prática de laminação em composites. Rio de Janeiro, Brasil, 2008.
- NOBRE, J. P.; STIFFEL, J. H.; NAU, A.; OUTEIRO, J. C.; BATISTA, A. C.; PAEPEGEM, W. V.; SCHOLTES, B. Induced drilling strains in glass fibre reinforced epoxy composites. *CIRP – Manufacturing Technology*, v.63, p.87-90, 2013.
- PATIL, D. B.; VIJAYKUMAR N. C. Effect of Sea Water on Drilling Processes of Glass Fibre Reinforced Epoxy Composite Materials to Analysis of Delamination Factor and Thrust Force. *International Journal of Engineering Research and Applications*, V. 4, 2014.
- PINTO, G. T. B. Análise da influencia da geometria de brocas especiais na furação de chapas finas aeronáuticas. UFSC, 2010.
- RAMOS, R. T. Materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra de vidrio. *Artículos Técnicos: Técnicas*

- constructivas. Colégio de Ingenieros Técnicos de Obras Públicas e Ingenieros Civiles, Madrid, Espanha, 2010.
- REVISTA Composites e plásticos de engenharia. Vol. 70, Editora do Administrador, São Paulo, Brasil, 2010.
- RISSE, P.; CARVALHO, G. A.; VIEIRA, S. L. e ZATTERA, A. J. Reaproveitamento de Resíduos de Laminados de Fibra de Vidro na Confeção de Placas Reforçadas de Resina Poliéster. Departamento de Engenharia Química (CCET), Universidade de Caxias do Sul – Rio Grande do Sul, 1998
- RUBIO¹, J. C.; ABRÃO, A. M.; FARIA, P. E.; DAVIM, J. P. Análise digital de dano na furação de materiais compósitos laminados - Ciência e Tecnologia dos Materiais, Vol. 19, n.º 1/2, 2007.
- RUBIO², J. C.; SILVA, L. R.; ABRÃO, A. M.; FARIA, P. E.; CORREIA, A. E.; DAVIM, J. P. Furação com alta velocidade de corte em compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro - Ciência e Tecnologia dos Materiais, Vol. 19, n.º 3/4, 2007.
- SANDVIK COROMANT. Catálogo: Ferramentas Rotativas – fresamento, furação, mandrilamento e sistemas de ferramentas. 2011.
- STEMMER, C. E. Ferramentas de corte II. Florianópolis, Santa Catarina, Brasil 1995.
- TARGA, G. N. Compósito reforçado por laminado de bambu com matriz de poliuretano e epóxi: desenvolvimento, produção e caracterização mecânica. Dissertação de mestrado em Engenharia Materiais, UFSC, 2011.
- TIROLA, M. F. Introdução á estatística: atualização da tecnologia. Ed. GEN, Rio de Janeiro, 2014.
- TSAO, C. C.; HOCHENG, H.; CHEN, Y. C.. Delamination reduction in drilling composite materials by active backup force – CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2012.
- VIKKI, F. Drilling of long fiber reinforced thermoplastics – influence of the cutting edge on the machining results. Manufacturing Technology 60, pág 65-68, 2011.
- WERTHEIM, R.; BEN-HANAN, U.; IHLENFELDT, S.; STOLL, A.; TREPPE, F.; WABNER, M. Acoustic emission for controlling drill position in fiber-reinforced plastic and metal stacks CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2012.

Apêndice A – Organização dos parâmetros e seqüência dos ensaios.

Ordem padrão	Ordem de execução	Tipos de broca	f (mm)	v_c (m/mim)
1	2	118°	0,08	10
2	29	118°	0,08	28
3	18	118°	0,08	57
4	32	118°	0,15	10
5	9	118°	0,15	28
6	15	118°	0,15	57
7	5	118°	0,3	10
8	33	118°	0,3	28
9	41	118°	0,3	57
10	14	130°	0,08	10
11	37	130°	0,08	28
12	36	130°	0,08	57
13	6	130°	0,15	10
14	4	130°	0,15	28
15	10	130°	0,15	57
16	20	130°	0,3	10
17	7	130°	0,3	28
18	17	130°	0,3	57
19	28	135°	0,08	10
20	3	135°	0,08	28
21	23	135°	0,08	57
22	22	135°	0,15	10
23	45	135°	0,15	28

Ordem padrão	Ordem de execução	Tipos de broca	f (mm)	v_c (m/mim)
24	40	135°	0,15	57
25	43	135°	0,3	10
26	31	135°	0,3	28
27	42	135°	0,3	57
28	21	140°	0,08	10
29	34	140°	0,08	28
30	1	140°	0,08	57
31	25	140°	0,15	10
32	12	140°	0,15	28
33	16	140°	0,15	57
34	35	140°	0,3	10
35	27	140°	0,3	28
36	8	140°	0,3	57
37	44	E-120°	0,08	10
38	24	E-120°	0,08	28
39	13	E-120°	0,08	57
40	38	E-120°	0,15	10
41	26	E-120°	0,15	28
42	39	E-120°	0,15	57
43	19	E-120°	0,3	10
44	30	E-120°	0,3	28
45	11	E-120°	0,3	57


















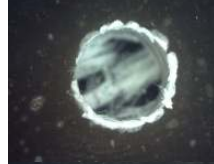



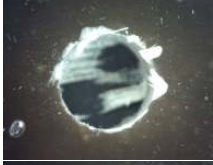


















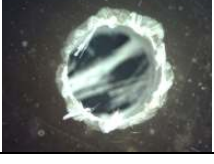




Apêndice B – Resultados teste Tukey para Fda(entrada) em ambos os materiais.

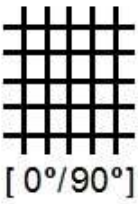
Material	Broca	f (mm)	v_c (m/mim)	Fda	Resultados
[0°/90°]	130°	0,30	57	1,87	A
[0°/90°]	140°	0,30	57	1,87	A
[0°/90°]	130°	0,30	28	1,79	A B
[0°/90°]	140°	0,30	28	1,77	A B C
[0°/90°]	135°	0,30	57	1,76	A B C D
[-45°/45°]	130°	0,30	57	1,75	B C D E
[-45°/45°]	140°	0,30	57	1,75	B C D E
[-45°/45°]	140°	0,30	28	1,72	B C D E F
[-45°/45°]	130°	0,30	10	1,70	B C D E F
[-45°/45°]	118°	0,30	57	1,69	B C D E F
[0°/90°]	140°	0,30	10	1,69	B C D E F G
[-45°/45°]	130°	0,08	57	1,67	C D E F G H
[0°/90°]	130°	0,30	10	1,66	C D E F G H I
[0°/90°]	118°	0,30	57	1,65	D E F G H I J
[0°/90°]	135°	0,30	28	1,65	D E F G H I J
[-45°/45°]	130°	0,30	28	1,65	E F G H I J
[-45°/45°]	135°	0,30	57	1,64	E F G H I J K
[-45°/45°]	118°	0,30	28	1,61	F G H I J K
[0°/90°]	118°	0,30	28	1,61	F G H I J K
[-45°/45°]	140°	0,30	10	1,58	G H I J K
[-45°/45°]	135°	0,30	28	1,57	H I J K L
[0°/90°]	118°	0,30	10	1,56	I J K L M
[-45°/45°]	118°	0,30	10	1,55	I J K L M N
[-45°/45°]	135°	0,30	10	1,55	J K L M N
[0°/90°]	135°	0,30	10	1,54	K L M N
[0°/90°]	130°	0,15	57	1,47	L M N O
[0°/90°]	140°	0,15	57	1,45	M N O P
[0°/90°]	130°	0,15	28	1,44	N O P Q
[0°/90°]	140°	0,15	28	1,42	O P Q R
[0°/90°]	135°	0,15	57	1,42	O P Q R S
[0°/90°]	118°	0,15	57	1,41	O P Q R S T
[-45°/45°]	130°	0,15	28	1,40	O P Q R S T
[0°/90°]	135°	0,15	28	1,40	O P Q R S T
[-45°/45°]	135°	0,08	28	1,40	O P Q R S T
[-45°/45°]	140°	0,15	57	1,39	O P Q R S T U
[-45°/45°]	118°	0,15	57	1,39	O P Q R S T U V
[-45°/45°]	118°	0,15	28	1,38	O P Q R S T U V W
[-45°/45°]	130°	0,15	10	1,38	O P Q R S T U V W
[0°/90°]	140°	0,15	10	1,38	O P Q R S T U V W X
[0°/90°]	135°	0,08	57	1,38	O P Q R S T U V W X
[0°/90°]	135°	0,15	10	1,38	O P Q R S T U V W X
[-45°/45°]	135°	0,08	57	1,38	O P Q R S T U V W X Y
[-45°/45°]	130°	0,15	57	1,37	O P Q R S T U V W X Y
[0°/90°]	130°	0,15	10	1,37	O P Q R S T U V W X Y

Anexo B – Resultados teste Tukey para Fda(entrada) em ambos os materiais. (continuação)



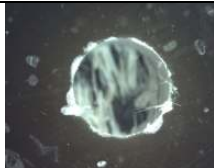

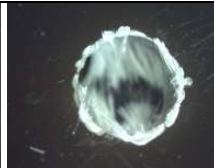












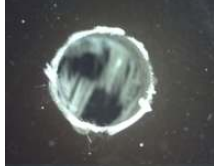






















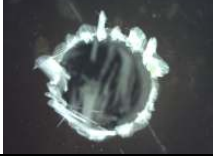




Material	Broca	f (mm)	v_c (m/mim)	Fda	Resultados
[-45°/45°]	135°	0,15	10	1,35	P Q R S T U V W X Y Z
[-45°/45°]	135°	0,08	10	1,35	P Q R S T U V W X Y Z
[-45°/45°]	140°	0,15	10	1,35	P Q R S T U V W X Y Z AA
[-45°/45°]	118°	0,08	57	1,35	P Q R S T U V W X Y Z AA
[-45°/45°]	118°	0,15	10	1,34	Q R S T U V W X Y Z AA AB
[-45°/45°]	135°	0,15	57	1,34	Q R S T U V W X Y Z AA AB AC
[-45°/45°]	135°	0,15	28	1,33	Q R S T U V W X Y Z AA AB AC
[-45°/45°]	E-90°	0,15	10	1,33	Q R S T U V W X Y Z AA AB AC
[-45°/45°]	140°	0,15	28	1,32	R S T U V W X Y Z AA AB AC AD
[0°/90°]	135°	0,08	28	1,32	R S T U V W X Y Z AA AB AC AD AE
[-45°/45°]	E-90°	0,08	28	1,31	R S T U V W X Y Z AA AB AC AD AE
[0°/90°]	118°	0,08	57	1,31	R S T U V W X Y Z AA AB AC AD AE
[0°/90°]	E-90°	0,08	28	1,31	S T U V W X Y Z AA AB AC AD AE AF
[0°/90°]	135°	0,08	10	1,30	T U V W X Y Z AA AB AC AD AE AF
[0°/90°]	118°	0,15	28	1,30	T U V W X Y Z AA AB AC AD AE AF
[-45°/45°]	E-90°	0,08	10	1,28	U V W X Y Z AA AB AC AD AE AF AG
[-45°/45°]	118°	0,08	28	1,28	U V W X Y Z AA AB AC AD AE AF AG AH
[0°/90°]	E-90°	0,08	10	1,28	V W X Y Z AA AB AC AD AE AF AG AH
[0°/90°]	140°	0,08	28	1,28	W X Y Z AA AB AC AD AE AF AG AH AI
[0°/90°]	118°	0,15	10	1,27	W X Y Z AA AB AC AD AE AF AG AH AI AJ
[0°/90°]	118°	0,08	28	1,27	X Y Z AA AB AC AD AE AF AG AH AI AJ
[-45°/45°]	E-90°	0,15	28	1,27	X Y Z AA AB AC AD AE AF AG AH AI AJ
[-45°/45°]	140°	0,08	57	1,27	Y Z AA AB AC AD AE AF AG AH AI AJ AK
[-45°/45°]	140°	0,08	28	1,25	Z AA AB AC AD AE AF AG AH AI AJ AK
[0°/90°]	130°	0,08	28	1,25	Z AA AB AC AD AE AF AG AH AI AJ AK
[-45°/45°]	E-90°	0,08	57	1,25	Z AA AB AC AD AE AF AG AH AI AJ AK
[-45°/45°]	140°	0,08	10	1,25	Z AA AB AC AD AE AF AG AH AI AJ AK
[-45°/45°]	130°	0,08	10	1,24	AA AB AC AD AE AF AG AH AI AJ AK AL
[0°/90°]	130°	0,08	57	1,24	AB AC AD AE AF AG AH AI AJ AK AL
[-45°/45°]	E-90°	0,15	57	1,23	AC AD AE AF AG AH AI AJ AK AL
[0°/90°]	140°	0,08	57	1,22	AD AE AF AG AH AI AJ AK AL
[0°/90°]	130°	0,08	10	1,22	AD AE AF AG AH AI AJ AK AL
[0°/90°]	140°	0,08	10	1,21	AD AE AF AG AH AI AJ AK AL
[-45°/45°]	118°	0,08	10	1,21	AE AF AG AH AI AJ AK AL
[0°/90°]	E-90°	0,15	10	1,21	AE AF AG AH AI AJ AK AL
[0°/90°]	E-90°	0,08	57	1,21	AE AF AG AH AI AJ AK AL
[-45°/45°]	130°	0,08	28	1,20	AF AG AH AI AJ AK AL
[0°/90°]	E-90°	0,30	57	1,18	AG AH AI AJ AK AL
[0°/90°]	E-90°	0,15	57	1,17	AG AH AI AJ AK AL
[-45°/45°]	E-90°	0,30	57	1,17	AH AI AJ AK AL
[0°/90°]	118°	0,08	10	1,17	AI AJ AK AL
[-45°/45°]	E-90°	0,30	28	1,16	AJ AK AL
[0°/90°]	E-90°	0,30	28	1,16	AK AL
[0°/90°]	E-90°	0,30	10	1,14	AL
[-45°/45°]	E-90°	0,30	10	1,13	AL
[0°/90°]	E-90°	0,15	28	1,13	AL

Apêndice C – Imagens da entrada dos furos [0°/90°].

f (mm)	v_c (m/mim)	118°	130°	Brocas 135°	140°	E-90°
0,08	10					
0,08	28					
0,08	57					
0,15	10					
0,15	28					
0,15	57					
0,30	10					
0,30	28					
0,30	57					



Apêndice D – Imagens da entrada dos furos [-45°/45°].

f (mm)	v_c (m/min)	118°	130°	Brocas 135°	140°	E-90°
0,08	10					
0,08	28					
0,08	57					
0,15	10					
0,15	28					
0,15	57					
0,30	10					
0,30	28					
0,30	57					
















































Apêndice E – Resultados teste Tukey para Fda(saída) em ambos os materiais.

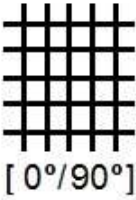
Material	Broca	f (mm)	V_c (m/mim)	Fda	Resultados
[0°/90°]	118°	0,3	28	3,61	A
[0°/90°]	118°	0,3	57	3,59	A
[0°/90°]	118°	0,08	57	3,47	A B
[0°/90°]	130°	0,15	57	3,23	B C
[0°/90°]	118°	0,15	57	3,20	B C D
[-45°/45°]	140°	0,3	57	3,18	B C D E
[0°/90°]	135°	0,3	28	3,14	B C D E F
[0°/90°]	130°	0,3	10	3,14	B C D E F
[-45°/45°]	135°	0,08	57	3,11	B C D E F G
[0°/90°]	135°	0,08	57	3,07	C D E F G H
[0°/90°]	135°	0,15	57	3,05	C D E F G H I
[-45°/45°]	140°	0,3	10	3,03	C D E F G H I J
[0°/90°]	140°	0,3	57	3,00	C D E F G H I J K
[-45°/45°]	140°	0,3	28	2,99	C D E F G H I J K
[0°/90°]	118°	0,3	10	2,96	C D E F G H I J K L
[0°/90°]	130°	0,3	28	2,94	C D E F G H I J K L M
[0°/90°]	140°	0,15	57	2,86	C D E F G H I J K L M N
[0°/90°]	140°	0,3	28	2,86	C D E F G H I J K L M N
[-45°/45°]	118°	0,3	28	2,84	D E F G H I J K L M N O
[-45°/45°]	118°	0,08	57	2,83	E F G H I J K L M N O
[-45°/45°]	140°	0,15	57	2,82	E F G H I J K L M N O P
[0°/90°]	130°	0,3	57	2,79	F G H I J K L M N O P Q
[-45°/45°]	135°	0,15	57	2,79	F G H I J K L M N O P Q
[-45°/45°]	118°	0,3	57	2,78	F G H I J K L M N O P Q
[0°/90°]	135°	0,15	28	2,77	G H I J K L M N O P Q R
[-45°/45°]	135°	0,3	28	2,76	G H I J K L M N O P Q R
[-45°/45°]	140°	0,15	28	2,76	G H I J K L M N O P Q R
[0°/90°]	135°	0,3	57	2,76	G H I J K L M N O P Q R
[-45°/45°]	118°	0,15	57	2,71	H I J K L M N O P Q R S
[-45°/45°]	140°	0,08	57	2,69	I J K L M N O P Q R S T
[-45°/45°]	130°	0,3	28	2,68	J K L M N O P Q R S T
[0°/90°]	140°	0,15	28	2,67	K L M N O P Q R S T U
[0°/90°]	135°	0,3	10	2,66	K L M N O P Q R S T U
[-45°/45°]	135°	0,08	28	2,65	K L M N O P Q R S T U V
[0°/90°]	140°	0,3	10	2,64	K L M N O P Q R S T U V W
[-45°/45°]	135°	0,3	57	2,61	L M N O P Q R S T U V W X
[-45°/45°]	118°	0,15	10	2,59	M N O P Q R S T U V W X Y
[-45°/45°]	130°	0,3	57	2,54	N O P Q R S T U V W X Y Z
[-45°/45°]	140°	0,15	10	2,53	N O P Q R S T U V W X Y Z A A
[-45°/45°]	140°	0,08	28	2,50	N O P Q R S T U V W X Y Z A A
[-45°/45°]	135°	0,15	28	2,49	O P Q R S T U V W X Y Z A A A B
[0°/90°]	135°	0,15	10	2,47	P Q R S T U V W X Y Z A A A B
[-45°/45°]	130°	0,15	57	2,45	Q R S T U V W X Y Z A A A B A C
[0°/90°]	118°	0,15	28	2,44	Q R S T U V W X Y Z A A A B A C

Anexo E – Resultados teste Tukey para Fda(saída) em ambos os materiais. (continuação)














































Material	Broca	f (mm)	v_c (m/mim)	Fda	Resultados
[-45°/45°]	135°	0,15	10	2,41	R S T U V W X Y Z AA AB AC AD
[-45°/45°]	130°	0,3	10	2,35	S T U V W X Y Z AA AB AC AD AE
[0°/90°]	118°	0,15	10	2,34	S T U V W X Y Z AA AB AC AD AE
[-45°/45°]	118°	0,3	10	2,34	S T U V W X Y Z AA AB AC AD AE
[-45°/45°]	118°	0,15	28	2,33	T U V W X Y Z AA AB AC AD AE
[-45°/45°]	130°	0,08	57	2,31	U V W X Y Z AA AB AC AD AE
[0°/90°]	130°	0,15	10	2,29	V W X Y Z AA AB AC AD AE
[-45°/45°]	140°	0,08	10	2,28	W X Y Z AA AB AC AD AE
[-45°/45°]	130°	0,15	28	2,27	X Y Z AA AB AC AD AE AF
[0°/90°]	130°	0,15	28	2,25	X Y Z AA AB AC AD AE AF AG
[0°/90°]	130°	0,08	57	2,25	X Y Z AA AB AC AD AE AF AG
[0°/90°]	140°	0,08	57	2,24	Y Z AA AB AC AD AE AF AG AH
[-45°/45°]	118°	0,08	28	2,19	Z AA AB AC AD AE AF AG AH AI
[-45°/45°]	135°	0,3	10	2,18	AA AB AC AD AE AF AG AH AI AJ
[0°/90°]	140°	0,08	28	2,17	AA AB AC AD AE AF AG AH AI AJ
[0°/90°]	140°	0,15	10	2,17	AA AB AC AD AE AF AG AH AI AJ
[0°/90°]	E-90°	0,3	10	2,14	AB AC AD AE AF AG AH AI AJ AK
[-45°/45°]	130°	0,15	10	2,09	AC AD AE AF AG AH AI AJ AK AL
[0°/90°]	135°	0,08	28	2,09	AC AD AE AF AG AH AI AJ AK AL
[-45°/45°]	130°	0,08	28	2,06	AD AE AF AG AH AI AJ AK AL AM
[0°/90°]	E-90°	0,3	28	2,06	AD AE AF AG AH AI AJ AK AL AM
[-45°/45°]	135°	0,08	10	2,06	AD AE AF AG AH AI AJ AK AL AM
[-45°/45°]	E-90°	0,3	57	2,04	AE AF AG AH AI AJ AK AL AM
[-45°/45°]	118°	0,08	10	2,04	AE AF AG AH AI AJ AK AL AM
[-45°/45°]	E-90°	0,3	10	2,01	AE AF AG AH AI AJ AK AL AM
[-45°/45°]	E-90°	0,08	10	1,92	AF AG AH AI AJ AK AL AM
[-45°/45°]	130°	0,08	10	1,92	AF AG AH AI AJ AK AL AM
[0°/90°]	140°	0,08	10	1,90	AG AH AI AJ AK AL AM
[0°/90°]	E-90°	0,08	28	1,89	AG AH AI AJ AK AL AM
[0°/90°]	135°	0,08	10	1,89	AG AH AI AJ AK AL AM
[0°/90°]	E-90°	0,08	10	1,88	AH AI AJ AK AL AM
[-45°/45°]	E-90°	0,15	10	1,88	AH AI AJ AK AL AM
[-45°/45°]	E-90°	0,3	28	1,88	AH AI AJ AK AL AM
[0°/90°]	118°	0,08	28	1,84	AI AJ AK AL AM
[0°/90°]	E-90°	0,15	10	1,82	AJ AK AL AM
[-45°/45°]	E-90°	0,15	28	1,82	AJ AK AL AM
[-45°/45°]	E-90°	0,08	28	1,81	AJ AK AL AM
[-45°/45°]	E-90°	0,08	57	1,78	AK AL AM
[0°/90°]	130°	0,08	28	1,78	AK AL AM
[0°/90°]	E-90°	0,3	57	1,76	AL AM
[0°/90°]	E-90°	0,15	57	1,75	AL AM
[-45°/45°]	E-90°	0,15	57	1,75	AL AM
[0°/90°]	118°	0,08	10	1,73	AL AM
[0°/90°]	130°	0,08	10	1,73	AL AM
[0°/90°]	E-90°	0,08	57	1,71	AL AM
[0°/90°]	E-90°	0,15	28	1,62	AM

Apêndice F – Imagens da saída dos furos [0°/90°].

f (mm)	v_c (m/mim)	118°	130°	Brocas 135°	140°	E-90°
0,08	10					
0,08	28					
0,08	57					
0,15	10					
0,15	28					
0,15	57					
0,30	10					
0,30	28					
0,30	57					



Apêndice G – Imagens da saída dos furos [-45°/45°].

f (mm)	v_c (m/min)	118°	130°	Brocas 135°	140°	E-90°
0,08	10					
0,08	28					
0,08	57					
0,15	10					
0,15	28					
0,15	57					
0,30	10					
0,30	28					
0,30	57					



Anexo A – Processo de montagem de uma embarcação.

